ESTADO VEGETATIVO • MICROORGANISMOS HALOFILOS

# INVESTIGACION y CIENCIA




Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

# Metano en Marte y Titán

ORIGEN CROMOSOMICO DEL CANCER

MAMIFEROS DESAPARECIDOS DE SUDAMERICA

REDES ELECTRICAS INTELIGENTES

UN BORRADOR CUANTICO DE FABRICACION CASERA




JULIO 2007
6,00 EUROS




Edición española de
SCIENTIFIC
AMERICAN

Julio de 2007

Número 370


3
HACE...
50, 100 y 150 años.

4
APUNTES
Nueva Orleans...
Química cuántica...
Cosmología.

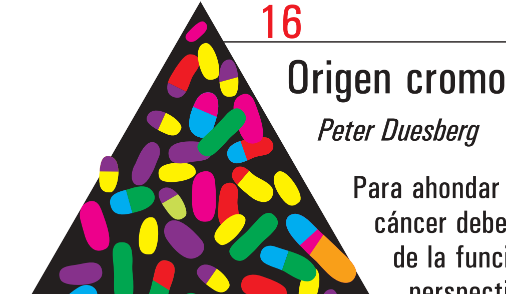


30
CIENCIA Y SOCIEDAD
Dieta del gato montés
en Eurasia...
La ameba social.

33
CIENCIA Y GASTRONOMÍA
Reblandecimiento de los alimentos,
por Hervé This



34
DE CERCA
Las rocas del cabo de Creus,
por Xavier Aurell



16
Origen cromosómico del cáncer
*Peter Duesberg*

Para ahondar en la comprensión del cáncer debemos ir más allá del estudio de la función génica y adoptar una perspectiva amplia de lo que ocurre en el interior de la célula.



24
Un borrador cuántico doméstico
*Rachel Hillmer Y Paul Kwiat*

Podemos realizar en el hogar un experimento donde se ponga de manifiesto uno de los efectos más extraños de la mecánica cuántica. El material necesario se obtiene con facilidad.



36
Redes eléctricas inteligentes
*Massoud Amin y Phillip F. Schewe*

Una red eléctrica que respondiese automáticamente a situaciones de emergencia reduciría el número de apagones. La situación en Estados Unidos ilustra los problemas actuales de la transmisión de electricidad.

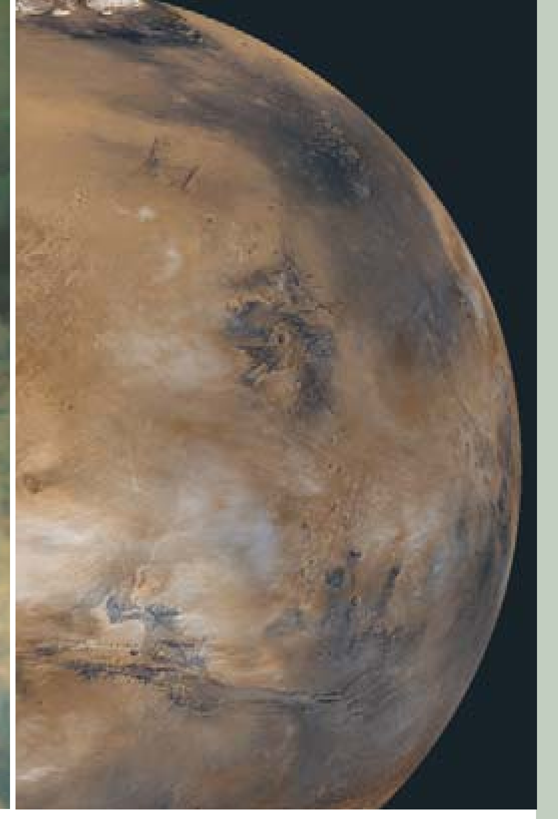
45
Nanomecánica de proteínas
*Mariano Carrión Vázquez*

La célula posee numerosos complejos proteínicos que operan como verdaderos dispositivos mecánicos, con auténticos motores y muelles que trabajan en un entorno que nos es poco familiar. Con el microscopio de fuerza atómica nos adentramos en sus entresijos.

54
Mamíferos desaparecidos de Sudamérica
*John J. Flynn, André R. Wyss y Reynaldo Charrier*

Los fósiles recién descubiertos en los Andes chilenos nos hablan de mamíferos únicos que antaño vagaban por Sudamérica. Tales hallazgos están cambiando las ideas existentes sobre la historia geológica del continente.

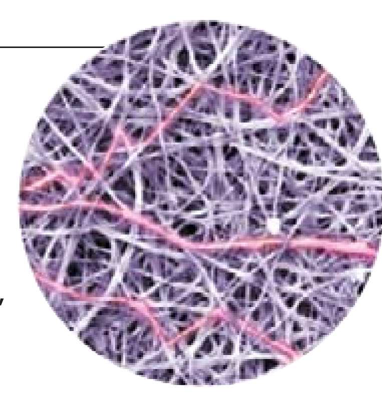


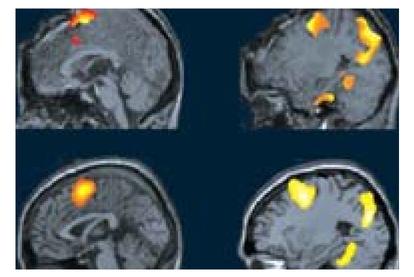
6
## El metano en Marte y Titán
*Sushil K. Atreya*

Podría significar vida o podría apuntar a una actividad geológica insólita. Sea lo que fuere, la presencia de metano en las atmósferas de Marte y Titán es uno de los problemas por resolver más apasionantes del sistema solar.

62
## Nanorredes de carbono: una nueva electrónica
*George Gruner*



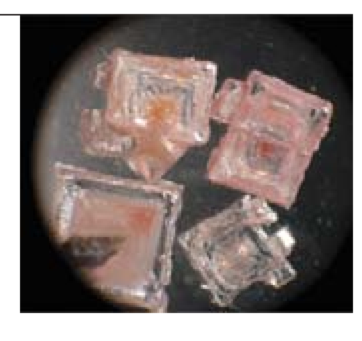
Con unas redes aleatorias formadas de tubos de carbono diminutos podrían construirse dispositivos flexibles de bajo coste, como el "papel electrónico" y las células solares impresas.



70
## Estado vegetativo
*Steven Laureys*

Las técnicas de formación de imágenes del cerebro arrojan luz sobre la pérdida de funciones cognitivas que acompaña al estado vegetativo.

78
## Microorganismos halófilos
*Shiladitya DasSarma*



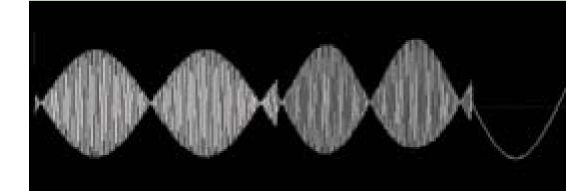
La investigación sobre los microorganismos que medran en medios salinos ahonda en los caracteres unificadores de la vida y los secretos moleculares de la supervivencia en condiciones extremas.

86
### CURIOSIDADES DE LA FÍSICA
El *bozo-bozo*,
por Jean-Michel Courty
y Edouard Kierlik



88
### JUEGOS MATEMÁTICOS
Sutilezas estadísticas,
por Juan M.R. Parrondo

90
### IDEAS APLICADAS
Sonido direccional,
por Mark Fischetti



92
### LIBROS
Einstein,
Lanzadera espacial.



96
### DESARROLLO SOSTENIBLE
Comienza el camino
hacia una energía limpia,
por Jeffrey D. Sachs




DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

## SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley,
Graham P. Collins, Steve Mirsky,
George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL
Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER
Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Brian Napack

## DISTRIBUCION

**para España:**

**LOGISTA, S. A.**
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

**para los restantes países:**

**Prensa Científica, S. A.**
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

## PUBLICIDAD

**Madrid:**
VdS Comunicación
Julia Domínguez
Dr. Fleming, 56 - 3.º dcha.
28036 Madrid
Tel. y fax 913 591 965
Móvil 649 879 433

**Cataluña:**
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

## COLABORADORES DE ESTE NUMERO

**Asesoramiento y traducción:**

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *El metano en Marte y Titán*; Juan Manuel González Mañas: *Origen cromosómico del cáncer*; Joandomènec Ros: *Mamíferos desaparecidos de Sudamérica*; Luis Bou: *Un borrador cuántico doméstico*, *Estado vegetativo*; Francisco E. Rodríguez Valera: *Microorganismos halófilos*; J. Vilardell: *Hace...*, *Ideas aplicadas* y *Curiosidades de la física*; M.ª Rosa Vallés: *Ciencia y gastronomía*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*



**Portada:** Ron Miller

## SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

**Precios de suscripción:**

| | Un año | Dos años |
|---|---|---|
| España | 65,00 euro | 120,00 euro |
| Resto del mundo | 100,00 euro | 190,00 euro |

**Ejemplares sueltos:**

El precio de los ejemplares atrasados
es el mismo que el de los actuales.






ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



## ...cincuenta años

**PARTÍCULAS ELEMENTALES.** «En la teoría de la extrañeza tenemos, pues, un procedimiento para clasificar las partículas extrañas. La teoría es coherente con la idea fundamental de cuatro grupos de partículas y tres tipos de reacciones. Nuestro nivel de comprensión actual es más o menos el que alcanzó Mendeleyev, quien descubrió sólo que los elementos exhibían ciertas regularidades en sus propiedades. Nos proponemos llegar al nivel de Pauli, cuyo principio de exclusión mostró el porqué de tales regularidades, y al de los inventores de la mecánica cuántica, quienes hicieron posible la obtención de predicciones exactas y detalladas sobre los sistemas atómicos. Quisiéramos conocer las leyes que rigen el movimiento de las partículas; predecir, entre otras cosas, sus interacciones en las colisiones y el modo en que esas interacciones desvían a una partícula cuando choca con otra. —Murray Gell-Mann y E. P. Rosenbaum»
[Nota de la redacción: Gell-Mann ganó el premio Nobel de física en 1969 por este trabajo]

**LLUVIA ARTIFICIAL.** «El Consejo Americano de Meteorología acaba de publicar una recapitulación sobre la prueba hoy disponible acerca de la eficacia de la siembra de nubes. Veredicto: Falta de pruebas. Las condiciones favorables para provocar la lluvia artificial, señala el comunicado, son casi las mismas que suelen desembocar en lluvia natural. El Consejo afirma: “La siembra de nubes actúa sólo provocando la descarga de nubes ya existentes”. No parecen existir pruebas convincentes de que los generadores de yoduro de plata emplazados en tierra provoquen el aumento de las precipitaciones en terrenos llanos. Parecen efectivos sólo en climas fríos y en regiones donde una cordillera obligue al aire a subir. Pudiera ser que la siembra de nubes actuara más para disipar éstas que para provocar la lluvia.»

Protección para bomberos, 1857

*SCIENTIFIC AMERICAN*, VOL. XII, Nº 44, 11 DE JULIO DE 1857

## ...cien años

**MARCIANOS.** «Si en Marte existe vegetación, tal como nos hace creer el profesor Lowell, nos encontramos de inmediato ante la posibilidad de que haya vida en ese planeta. La existencia de flora constituye una razón para suponer que hay una fauna. Los canales y los oasis de Marte nos ofrecen exactamente el aspecto que mostraría el planeta si éste fuera un mundo habitado. La escasez de agua es la clave de la índole de los canales. La única agua disponible en Marte es la que procede de la fusión semianual en uno u otro de los casquetes de nieve. De existir seres inteligentes en Marte, deben hallar algún medio para transportar las escasas existencias de agua desde los polos hasta los centros de población.»

**AUTOCHROME LUMIÉRE.** «Un nuevo proceso de fotografía en color ha llegado al mercado en París de la mano de los señores Auguste y Louis Lumiére, quienes se cuentan entre los *savants* de la vanguardia de este dominio de la ciencia. Pueden hacer una toma en color sobre una placa y con una cámara corriente, con exposiciones de un segundo o menos. Para preparar esta placa especial se disponen partículas microscópicas cromáticas sobre una placa de vidrio (se ha descubierto que el almidón de patata es la sustancia que mejor se adapta a este fin). Se emplean partículas de tres colores para formar los tamices de color [filtros] de la placa. La capa de granos coloreados se cubre primero con un barniz estanco, a lo que sigue una capa de bromuro gelatinoso en emulsión que se hace perfectamente pancromático y es sensible a todos los colores.»
[Nota de la redacción: El proceso Autochrome fue el más extendido en la fotografía en color hasta la aparición del Kodachrome en 1935 y del Agfacolor en 1936.]

## ...ciento cincuenta años

**PROTECCIÓN PARA BOMBEROS.** «En las viviendas llenas de humo hasta el extremo de imposibilitar la respiración a la altura de la cabeza de un hombre con respecto al suelo, casi siempre hay una corriente de aire puro y fresco a ras del piso. Para aprovechar tal circunstancia, se ha ideado una máscara que se ajusta perfectamente y de la que penden unos tubos de toma de aire, a través de los cuales respira la persona; los extremos de los tubos quedan entre tres y cinco centímetros del suelo.»

**PISCICULTURA.** «Nos agradaría grabar de modo indeleble en la mente de quienes desean repoblar nuestras corrientes de agua con abundantes peces de buena calidad que, si desean lograr su propósito, deben mantener puras y limpias las aguas. Es verdad que los salmones y otras especies han sido desterrados de los ríos y los riachuelos donde antes abundaban, pero no se debe ello a la depredación de los pescadores, como por lo general se ha supuesto. La construcción de aserraderos a orillas de riachuelos y ríos destruyó las huevas de salmón y de trucha; asimismo, el salmón ha sido expulsada de todos los ríos junto a los cuales se han establecido plantas químicas. Como peces sensibles que son, les encantan las corrientes de aguas claras.»

NUEVA ORLEANS

## Aún en peligro

Hace un año que se repararon las brechas en los malecones que rodean Nueva Orleáns. Sin embargo, la recuperación de la región en sí no cobrará impulso antes de la próxima década. El sistema de diques en su conjunto sigue siendo inadecuado para las grandes tormentas, y hasta 2011 por lo menos no se habrán instalado protecciones duraderas de la ciudad y el delta circundante.

Para determinar las causas y las implicaciones de las roturas de malecones que siguieron al huracán Katrina, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU. ha trabajado en unión con otros organismos federales y grupos de expertos. Se ha formado así el Grupo Interdepartamental para la Evaluación de la Operatividad (IPET, por sus siglas en inglés). En su informe final, Lewis E. Link, ingeniero de la Universidad de Maryland, expresa una gran confianza en las enseñanzas aprendidas en esta tarea.

El IPET encontró que la mayor parte de las roturas sobrevinieron cuando el agua desbordaba los malecones de tierra y corría sobre sus bermas, erosionando los cimientos exteriores. Estimaron, sin embargo, que dos terceras partes del agua que inundó el recinto urbano provenía de grandes brechas en los diques de contención, unos altos y estrechos muros de hormigón levantados en zonas demasiado habitadas para construir malecones anchos. Elevar la altura de estos muros no sería una solución: los cimientos actuales no podrían soportar entonces las presiones creadas por los altos niveles del agua en toda la estructura de contención. Link afirma que, en la mayoría de los lugares afectados, sería preferible destruirlos y empezar de nuevo. En palabras del coronel Jeffrey Bedey, jefe del Cuerpo de Protección contra Huracanes de Nueva Orleáns y supervisor de los trabajos de recuperación y evaluación de riesgos: “Si hiciéramos muros más altos, introduciríamos nuevos riesgos de inestabilidad.”

El problema se ha agudizado por la subsidencia, el paulatino hundimiento de todo el sistema de malecones y muros, con decenios de antigüedad en varios de sus tramos. Las sucesivas reparaciones no han hecho sino restaurar el sistema conforme a sus especificaciones originales, que sólo contemplaban un huracán de Clase 3. Y, a causa de la subsidencia experimentada, el sistema en realidad sólo ofrece protección de Clase 2, afirma Hassan Mashriqui, miembro del grupo operativo de trabajo de la Sociedad Norteamericana de Ingenieros Civiles que investigó los fallos de los diques. Por añadidura, hay malecones hace tiempo proyectados para el límite occidental de la urbe que todavía no se han construido.

Los malecones y muros no ofrecen, pues, en sí mismos una protección suficiente, sobre todo para las tormentas de Clase 4 y Clase 5 que puede acarrear el calentamiento global. Hace falta un sistema de barreras más extenso: bien una enorme fila de malecones interpuesta a medio camino entre Nueva Orleáns y el golfo de México, o bien un escudo exterior en la propia costa del golfo, a la manera de los diques holandeses.

Esas fueron las soluciones preferidas, el pasado febrero, por la Autoridad de Protección y Recuperación de Costas de Luisiana, una coalición de numerosos organismos de ese estado. El plan concuerda con determinaciones de expertos [*véase* “Protecciones para Nueva Orleáns”, por Mark Fischetti; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2006].

La Autoridad ha presentado un plan al Cuerpo de Protección contra Huracanes, que a su vez prepara su propio informe. Ambos anteproyectos incluyen la instalación de compuertas anchas en aquellos lugares donde los grandes canales naturales y artificiales actuaron como un “embudo” de la tempestuosa crecida de aguas que el Katrina propulsó hacia las conducciones interiores de la ciudad, haciendo que reventasen los diques de contención. Las compuertas cerrarían asimismo las en-

LEYENDA
- A una altura igual o superior a la autorizada
- 0 a 60 cm menos que la altura autorizada
- > 60 cm menos que la altura autorizada
- Trabajos aún no iniciados
- Esclusa

**1. Los malecones de Nueva Orleáns ya se han reparado, pero el sistema entero está perdiendo alzado con respecto a su diseño original, que ya ofrecía protección sólo contra un huracán de Clase 3.**



**2. Un nuevo dique se levanta a lo largo del Canal Industrial, donde una enorme brecha inundó el Noveno Distrito Inferior.**

INTERAGENCY PERFORMANCE EVALUATION TASK FORCE (*arriba*); MARIO TAMA *Getty Images* (*abajo*)

tradas desde el Golfo al extenso lago Pontchartrain, en el borde norte de la ciudad. El Cuerpo de Protección ha instalado ya tres pequeñas compuertas en los extremos de los canales que controlan las inundaciones en la ciudad interior, pero se necesitarían otras mucho mayores en los canales.

El mencionado Cuerpo está en tratos con once firmas de diseño y construcción, aunque erigir las compuertas y aplicar todas las medidas conexas llevará su tiempo. Según Becey, la estructura podría estar levantada hacia 2011 o 2012. La larga hilera de malecones a lo largo del delta o el escudo en el golfo de México tardarían todavía más en realizarse. Lo mismo sucedería con las estructuras que desvían el agua dulce y los sedimentos del río Mississippi hacia el delta, necesarias para rejuvenecer los mermados humedales de manera que ofrezcan un mejor escudo natural contra los huracanes.

Aunque la región no ganará mucho en seguridad durante los años inmediatos, sus habitantes podrían abrigar un prudente optimismo. Tras haberse reunido con dirigentes locales, estatales y federales, Link asegura que admiten que un desarrollo a largo plazo requiere evaluar los riesgos y no ponerse a reconstruir sea como sea. No fue esa la línea de actuación tras el desastre. Este acuerdo concertado entre los tres niveles de gobierno puede ser la mejor señal para Nueva Orleáns en su camino hacia el futuro.

*—Mark Fischetti*

## QUIMICA CUANTICA

# El poder antioxidante del té verde



El efecto antioxidante del té verde se debe a un fenómeno cuántico. Un grupo de investigación en bioquímica computacional de la Universidad Autónoma de Barcelona ha desarrollado un modelo teórico basado en cálculos mecanocuánticos que simula la acción antioxidante de las catequinas, unos de los compuestos principales del té verde.
Esos flavonoides reaccionan con los radicales libres mediante la donación de un átomo de hidrógeno. Según los cálculos teóricos, el grupo catecol (de la molécula de catequina) forma un complejo “compacto” con el radical libre. Con ello se estrecha la barrera de energía que separa reactivos y productos; por tanto, favorece que la transferencia de hidrógeno se produzca mediante efecto túnel (el efecto túnel es mayor cuanto menor es la anchura de la barrera energética). El fenómeno cuántico acelera la reacción en grado tal, que las catequinas se convierten en una suerte de “trampas de radicales libres”: éstos pierden su poder oxidante antes de que puedan atacar a los componentes celulares, con lo que se frena el envejecimiento de las células.

## COSMOLOGIA

# ¿Hacia dónde se expande el universo?

La relatividad general describe la evolución del universo. Esta teoría einsteiniana funde espacio y tiempo en un solo continuo cuadridimensional. La expansión no va llevando el espacio más allá a lo largo del tiempo, porque no hay más allá alguno, ningún afuera por donde expandirse. Son las distancias internas del espacio las que crecen. En la física prerrelativista, los cuerpos se mueven según las leyes de Newton, el espacio y el tiempo son absolutos y la gravedad es una fuerza de atracción de origen misterioso. La relatividad general difiere conceptualmente de este esquema, aunque sus ecuaciones se reduzcan a las newtonianas en muchos casos prácticos. Los cuerpos especifican la propiedad del espaciotiempo. Lo curvan. Las interacciones gravitatorias son manifestaciones de esa curvatura: los cuerpos caen de las zonas menos curvadas a las más curvadas. El espacio, según las ecuaciones de Einstein, no puede en general permanecer estacionario: se expande o contrae. No es que las galaxias se muevan y por eso se alejen unas de otras. Más bien es como si estuviesen sujetas a los nodos de una retícula que se dilata. Otra analogía: marcas en la piel de un globo que se hincha. Desde cada marca parecería que las demás se alejan de ella, pero todas conservan la misma latitud y longitud sobre la superficie del globo. Claro que el globo bidimensional se expande en un ámbito tridimensional; para que la comparación tenga sentido hay que abstraer ese espacio en que está inmerso el globo y tener en cuenta sólo qué sucede sobre su piel.

*—Alexander Kashlinsky,*
*Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA*



MELVIN PIRO/WWW.MORGUEFILE.COM (*arriba*); MATT COLLINS (*abajo*)



# El metano en Marte y Titán

Sushil K. Atreya

1. SIEMPRE SE HA PENSADO QUE MARTE podría albergar vida. El descubrimiento de metano en su atmósfera ha reavivado esa idea. La cara de Marte parece estática, aparte de unas nubes escasas y ralas (*blanco*). El metano, sin embargo, apunta a una intensa actividad subterránea biológica o geoquímica.

**Salvo la Tierra, no hay planeta del sistema solar con mejores condiciones para albergar vida, extinta o actual, que Marte. Se parece a la Tierra en muchos aspectos: el proceso de su formación, la historia climática de sus primeros tiempos, sus reservas de agua o, entre otros fenómenos geológicos, sus volcanes. Algunos microorganismos no se encontrarían mal allí. Cuando se habla de biología extraterrestre suele salir a colación Titán, la mayor luna de Saturno. En su pasado remoto fue un buen lugar para la aparición de los precursores moleculares de la vida; hay quienes creen que pudo tener vida entonces, más aún, que podría seguir albergándola.**

**El descubrimiento, en ambos mundos, de un gas que se asocia con frecuencia a los seres vivos, el metano, alienta esas esperanzas. Lo hay en cantidades, pequeñas aunque significativas, en Marte. Titán está bañado en metano. Un origen biológico es al menos tan verosímil como uno geológico en Marte y quizá también en Titán. La explicación, en cualquier caso, será fascinante: o bien no estamos solos en el universo, o bien tanto Marte como Titán contienen grandes cantidades de agua subterránea con niveles inesperados de actividad geoquímica. Descubrir el origen y suerte del metano en estos cuerpos resulta crucial para el conocimiento de la formación, evolución y habitabilidad de mundos terrestres en nuestro sistema solar y en otros sistemas planetarios.**

**El metano ($CH_4$) que abunda en los planetas gigantes —Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno— se generó en los procesos químicos que sufrió el material de la nebulosa solar primigenia. En la Tierra, sin embargo, el metano es especial. De las 1750 partes por mil millones en volumen del metano en la atmósfera terrestre, del 90 a 95 por ciento tiene un origen biológico. Los eructos de los ungulados herbívoros, vacas, cabras o yaks, emiten una quinta parte de la producción global anual de metano, producto metabólico de las bacterias de sus intestinos. Otras fuentes importantes de metano son las termitas, los campos de arroz, las ciénagas, las filtraciones de gas natural (a su vez un resultado de vida anterior) y, al parecer, la fotosíntesis de las plantas [*véase* “Metano, plantas y cambio climático”, por Frank Keppler y Thomas Röckmann; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril 2007]. Los volcanes contribuyen con menos del 0,2% al cómputo total de metano en la Tierra, y el que emiten podría haber sido producido por organismos del pasado. Las fuentes abióticas, la industria por ejemplo, contribuyen aún menos. Por tanto, la detección de metano en cuerpos celestes del tipo de la Tierra acrecienta las expectativas de que haya vida en ellos.**

Podría significar vida o podría apuntar a una actividad geológica insólita. Sea lo que fuere, la presencia de metano en las atmósferas de Marte y Titán es uno de los problemas por resolver más apasionantes del sistema solar

2. TITAN, SATELITE DE SATURNO pero a todos los efectos un auténtico planeta, cuenta con una atmósfera de nitrógeno más densa que la de la Tierra y una superficie esculpida por la actividad tectónica y por ríos de metano líquido. Se ignora de dónde procede el metano. Esta imagen infrarroja combina imágenes tomadas en el infrarrojo por la nave Cassini.



NASA/JPL/UNIVERSIDAD DE ARIZONA (*Titán*); NASA/JPL/MSSS (*Marte*)

## En el aire

Así ocurrió con Marte en 2003 y 2004, cuando tres grupos no ligados entre sí anunciaron el descubrimiento de metano en la atmósfera del planeta. Empleando espectrógrafos de alta resolución del telescopio infrarrojo de Hawai y del telescopio Geminis del Sur, en Chile, el equipo dirigido por Michael Mumma, del Centro Goddard de Vuelos Espaciales, adscrito a la NASA, detectó concentraciones de metano de más de 250 partes por mil millones en volumen. Variaban a lo largo de la superficie del planeta, y quizá también a lo largo del tiempo. Vittorio Formisano y sus colaboradores (entre ellos el autor), del Instituto de Física y Ciencias Interplanetarias de Roma, analizaron miles de espectros infrarrojos tomados por la sonda Mars Express. Hallamos metano en cantidades menores, desde cero hasta unas 35 partes por mil millones en volumen, con un promedio planetario de unas 10 partes por mil millones. Por último, Vladimir Krasnopolsky y su equipo, de la Universidad Católica de América, midieron con el telescopio de Canadá-Francia-Hawai una media planetaria también de unas 10 partes por mil millones en volumen. No pudieron determinar las variaciones sobre el planeta por la pobreza de la señal y una escasa resolución espacial.

El equipo de Mumma está ahora reanalizando sus datos para determinar por qué obtuvieron un valor tan diferente del alcanzado por los otros grupos. Por ahora, tomaré la cantidad de 10 partes por mil millones en volumen como la medida más probable. Equivale a una concentración de metano (en moléculas por unidad de volumen) 40 millones de veces inferior a la concentración en la atmósfera de la Tierra. No obstante, incluso esta escasa presencia del gas demanda una explicación.

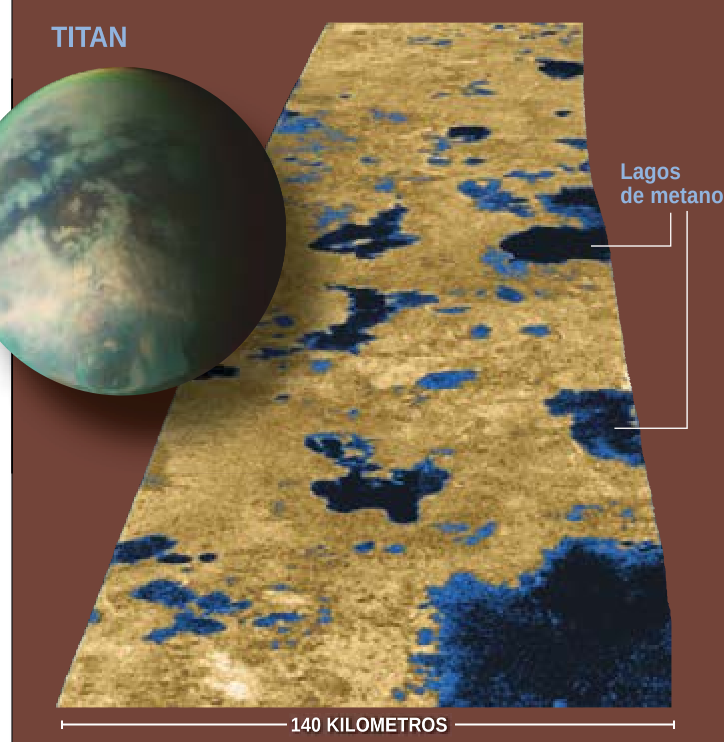
Aunque se sabía desde 1944 que en Titán había metano, fue el hallazgo de nitrógeno 36 lo que desató una ola de interés por ese satélite frío y lejano [*véase* “Titán”, por Tobias Owen; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril 1982].

## Resumen/*Metano*

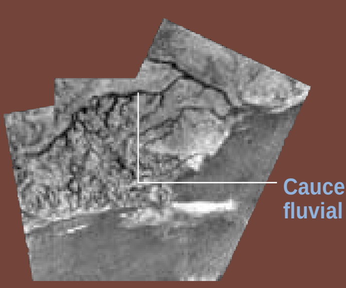
- Se viene hablando de la vida en Marte al menos desde hace más de un siglo, pero rara vez se contaba con el respaldo de datos sólidos. La situación cambió en 2003 con el descubrimiento de metano en la atmósfera del planeta. Ha de existir algún proceso que reponga el gas y compense su destrucción constante por parte de la luz solar.
- Se ha reducido el número de posibilidades a dos. En razón de la primera, habría bacterias que liberaran metano, como las de los intestinos de las vacas. En virtud de la segunda, se daría una reacción entre las rocas y el agua, la “serpentinización”, como sucede en los humeros negros de las profundidades marinas de la Tierra. De ser cierta, la segunda explicación constituiría todo un hallazgo de trascendente importancia. Un todoterreno que partirá hacia Marte en 2009 podría resolver esta cuestión.
- Un debate parecido se centra en el mayor satélite de Saturno, Titán. En el año 2005, la sonda espacial Huygens reveló que el metano desempeñaba allí una función muy semejante a la del agua en la Tierra; podría tener su origen en las reacciones geoquímicas de un vasto océano oculto.

## INSTANTANEAS DE TITAN Y MARTE

Se descubrió metano en la atmósfera de Titán hace más de medio siglo, en los años cuarenta. Una densa bruma impedía ver la superficie desde la Tierra. La misión Cassini-Huygens ha observado el grado de participación del metano en la conformación del relieve.




**GRANDES MASAS** de líquido, probablemente metano, en el hemisferio norte de Titán. En estas imágenes de radar, el líquido se presenta de color oscuro (*azul*) por la misma razón por la que una carretera mojada parece oscura cuando se conduce de noche: la superficie líquida, lisa, desvía la luz de los faros de nuestros ojos. Por el contrario, el terreno seco y tosco se nos ofrece brillante (*color bronceado*). La imagen tiene una resolución de 500 metros.




**LOS CAUCES FLUVIALES** podrían haber sido excavados por metano líquido que fluía desde las colinas (de unos 200 metros de altura) hacia la zona del lago (ahora seco). La red de afluentes da a entender que el metano procedía de la lluvia. La sonda Huygens tomó esta imagen desde una altura de 6,5 kilómetros en su descenso por la atmósfera.

El nitrógeno es un componente clave de aminoácidos y ácidos nucleicos, moléculas biológicas. Un objeto con una atmósfera rica en nitrógeno y metano, donde la presión en la superficie es 1,5 veces superior a la de nuestro planeta, podría tener los ingredientes apropiados de los precursores moleculares de la vida y, como algunos han conjeturado, formar la vida misma.

El metano desempeña una función central en el mantenimiento de la espesa atmósfera de nitrógeno en Titán. Es la fuente de las brumas de hidrocarburos que, al absorber la radiación infrarroja solar, calientan la estratosfera en unos 100 grados centígrados, y también del hidrógeno, cuyas colisiones moleculares aportan




LA BRUMA de las capas altas de la atmósfera de Titán está formada por hidrocarburos generados cuando la luz solar incide sobre el metano. El fulgor recuerda la contaminación urbana. Imagen con una resolución de 700 metros.



LA SUPERFICIE DE TITAN sólo pudo verse cuando la sonda Huygens aterrizó allí en enero de 2005. Puede parecer un pedregal monótono, pero las "piedras" son pedazos de hielo del tamaño de un puño que, en un examen más detallado, muestran signos de erosión por un líquido, posiblemente metano. Cuando la sonda lo calentó, el suelo rezumó metano.

En el Planeta Rojo hay metano en una proporción de sólo unas partes por mil millones en volumen, por lo que no se puede apreciar tan directamente como en Titán. Varios procesos observados podrían destruirlo o crearlo.




**LOS REMOLINOS** de polvo, como el descubierto por el Explorador Global de Marte el 21 de mayo de 2002, hacen que unos granos rocen con otros. Se generan así intensos campos eléctricos estáticos, que disocian las moléculas de agua y crean peróxidos que destruyen el metano.

| DATOS SOBRE EL METANO | TIERRA | MARTE | TITAN |
|---|---|---|---|
| **Concentración atmosférica** | 1750 partes por mil millones en volumen | 10 partes por mil millones en volumen | 5 por ciento |
| **Vida media molecular en la atmósfera (años)** | 10 | 600 | 10 millones |
| **Ritmo de producción necesario para mantener una cantidad constante (toneladas por año)** | 515 millones | 125 | 25 millones |
| **Principales fuentes** | Ganado, termitas, ciénagas, campos de arroz, gas natural | ¿Bacterias? Reacciones entre agua y rocas en los acuíferos | Reacciones entre rocas y agua en océanos subterráneos |






**RIOS DE AGUA SUBTERRANEA** del pasado de Marte explicarían esta cresta blanquecina (*flecha*) observada hace poco por el satélite Mars Reconnaissance. El flujo de agua a través de las fracturas de las rocas habría depositado minerales, tal y como el agua dura se adhiere a las tuberías de una casa. Cuando se erosiona la roca circundante, quedan los minerales, que forman la cresta. El agua subterránea podría también haber facilitado la producción de metano.

NASA/JPL/UNIVERSIDAD DE ARIZONA (*imagen de Titán de la página contigua e imagen de la cresta*); NASA/JPL/USGS (*lagos*); ESA/NASA/JPL/UNIVERSIDAD DE ARIZONA (*río y superficie de Titán*); NASA/JPL/MSSS (*imágenes de Marte e imagen del remolino*); NASA/JPL/INSTITUTO DE CIENCIAS ESPACIALES (*niebla*)

20 grados a la troposfera. Si el metano se agotara, las temperaturas caerían, el nitrógeno gaseoso se condensaría en gotas líquidas y la atmósfera se desplomaría. La singular naturaleza de Titán cambiaría para siempre. La niebla y las nubes se disiparían. Cesaría la lluvia de metano que parece haber esculpido la superficie. Los lagos, las charcas y las corrientes se secarían. Y, con el velo levantado, la rígida superficie de Titán se mostraría desnuda a los telescopios de la Tierra. Titán perdería su misterio y se convertiría en un satélite más con una fina capa de aire.

¿Podría tener el metano de Marte y de Titán un origen biológico, como en la Tierra, o existe otra explicación, los volcanes o quizás impactos de cometas y meteoritos? Nuestro conocimiento de los procesos geofísicos, químicos y biológicos angosta el espectro de posibilidades en Marte; muchos de los argumentos valen también para Titán.

## Divididos por la luz solar

El primer paso para responder a la pregunta es la determinación del ritmo al que debe producirse o liberarse el metano. Esa tasa depende, a su vez, de la velocidad a que se le elimina de la atmósfera. Cuando se sobrepasan los 60 kilómetros de altura sobre la superficie marciana, la radiación ultravioleta del Sol rompe las moléculas

de metano. A menos altura, los átomos de oxígeno y los radicales hidroxilo (OH) —formados al disociarse las moléculas de agua cuando chocan con los fotones ultravioletas— oxidan el metano. Sin una reposición, el metano desaparecería de la atmósfera poco a poco. La "vida media" del metano —el tiempo necesario para que una concentración de gas merme en un factor igual al número *e*, es decir, para que se quede en poco más de un tercio de la cantidad original— es de 300 a 600 años, dependiendo de la cantidad de vapor de agua, que está sometida a cambios estacionales, y de la intensidad de la radiación solar, que varía con el ciclo del Sol.

En la Tierra, esos procesos le dan al metano una vida media de 10 años. En Titán, donde la radiación ultravioleta es bastante más débil y las moléculas con átomos de oxígeno abundan mucho menos, el metano puede durar de 10 a 100 millones de años (aun así, un tiempo muy corto en términos geológicos).

La vida media del metano en Marte persiste lo suficiente para que los vientos y la difusión mezclen el gas en la atmósfera con notable uniformidad. Y por ello resultan desconcertantes las variaciones observadas de los niveles de metano en el planeta. Podrían deberse a fuentes o sumideros locales. Valdría como sumidero un suelo químicamente reactivo, que acelerase la pérdida de metano. Si existiera un sumidero de esa índole, se necesitaría una fuente aún mayor para mantener las proporciones de metano que se han medido.

Ahora hay que explicar la formación del metano. El Planeta Rojo es un buen lugar para empezar, ya que el metano escasea allí. Si un mecanismo se revela incapaz de justificar la exigua cantidad de ese gas allí, mucho menos podría dar cuenta de su abundancia en Titán. Con una vida media de 600 años, se han de producir algo más de 100 toneladas métricas de metano por año, unas 25 millonésimas de la producción terrestre, para mantener una media global de 10 partes por mil millones en volumen.

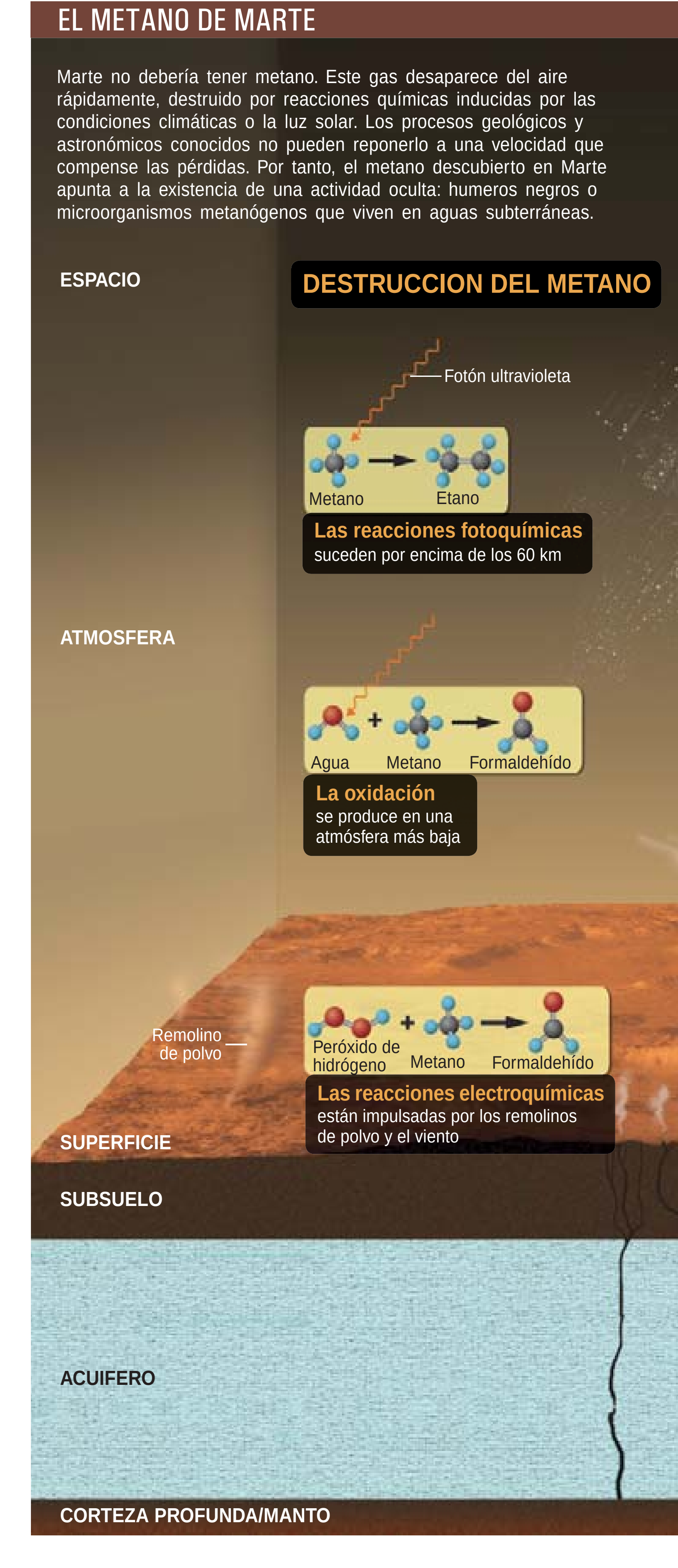
Igual que en la Tierra, tampoco parece que la actividad volcánica sea la fuente responsable. Los volcanes de Marte llevan extintos cientos de millones de años. Es más, si un volcán hubiera emitido metano, habría expulsado también mucho dióxido de azufre; mas la atmósfera de Marte se halla libre de compuestos de azufre.

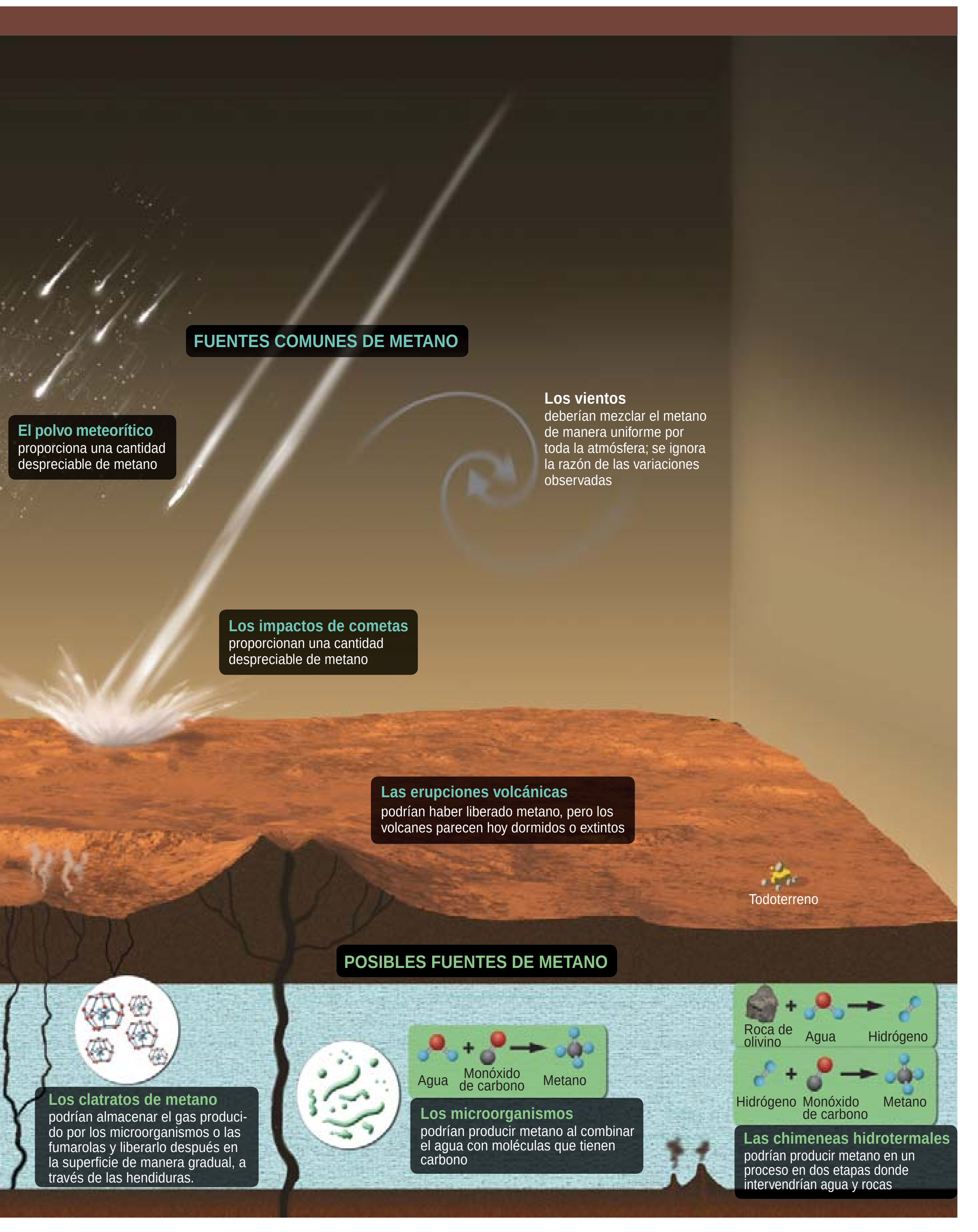
Las contribuciones de fuera del planeta parecen mínimas. Se estima que unas 2000 toneladas de polvo micrometeorítico alcanzan la superficie de Marte cada año. Menos del 1 por ciento de esa masa es carbono, que además llega en buena parte oxidado y por tanto no supone una fuente importante de metano. Los cometas son metano en un 1 por ciento de su peso, pero golpean Marte, en promedio, sólo una vez cada 60 millones de años. Por tanto, la cantidad de metano depositada en Marte es de una tonelada al año, menos del 1 por ciento de la cantidad requerida.

¿Chocó algún cometa contra Marte en un pasado reciente? Habría aportado el metano, mermado desde entonces hasta los valores actuales. El impacto de un cometa de 200 metros de diámetro hace 100 años, o de 500 metros hace 2000, habría proporcionado metano suficiente para explicar la cantidad global de 10 partes en mil millones. Pero esta idea no está exenta de pro-

## EL METANO DE MARTE

Marte no debería tener metano. Este gas desaparece del aire rápidamente, destruido por reacciones químicas inducidas por las condiciones climáticas o la luz solar. Los procesos geológicos y astronómicos conocidos no pueden reponerlo a una velocidad que compense las pérdidas. Por tanto, el metano descubierto en Marte apunta a la existencia de una actividad oculta: humeros negros o microorganismos metanógenos que viven en aguas subterráneas.






RON MILLER; MELISSA THOMAS *(reacciones químicas)*

blemas. La distribución de metano no es uniforme en el planeta. El tiempo necesario para esparcir en vertical y horizontal el metano de manera homogénea es como mucho de varios meses. Una fuente cometaria causaría una distribución uniforme del gas en la atmósfera de Marte: no es eso lo que se observa.

## Humo en las aguas

Esto nos deja con dos fuentes posibles: hidrogeoquímica y microbiana. Ambas hipótesis son apasionantes. Las chimeneas hidrotermales, o "humeros negros", se descubrieron en la Tierra en 1977, en la falla de las Galápagos [*véase* "La cresta de la dorsal del Pacífico oriental", por Ken C. Macdonald y Bruce P. Luyendyk; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 1981]. Desde entonces se las ha visto en muchas otras cordilleras oceánicas. Los experimentos de laboratorio muestran que en las condiciones típicas de estas chimeneas, los silicatos ultramáficos —rocas ricas en hierro o magnesio, como el olivino y el piroxeno— producen hidrógeno mediante un proceso de serpentinización. A su vez, la reacción del hidrógeno con granos de carbono, dióxido de carbono, monóxido de carbono y minerales carbonáceos genera metano.

Los ingredientes de este proceso son hidrógeno, carbono, metales (que actúan como catalizadores), calor y presión. Marte dispone de todos. La serpentinización puede ocurrir a altas temperaturas (350 a 400 grados centígrados) o a temperaturas intermedias (30 a 90 grados). Se cree que los acuíferos alegados de Marte tendrían temperaturas dentro de este intervalo más bajo.

Si bien la serpentinización de baja temperatura podría crear el metano marciano, la biología sigue siendo una posibilidad que debe tomarse en cuenta. En la Tierra hay microorganismos que liberan metano como subproducto de la consumición de hidrógeno y dióxido y monóxido de carbono. Si estos microorganismos vivieran en Marte, dispondrían de nutrientes: el hidrógeno de la serpentinización, o difundido desde la atmósfera hasta el suelo, y dióxido y monóxido de carbono de las rocas o de la atmósfera.

Una vez creado por la serpentinización o por los microorganismos, el metano se almacenaría en un clatrato estable —una estructura química que enjaula las moléculas de metano—, desde donde acabaría llegando a la atmósfera, quizá mediante emanaciones graduales a través de grietas o fisuras o por medio de episodios violentos de vulcanismo. Se desconoce con qué eficiencia se crearían los clatratos, ni su predisposición a desestabilizarse.

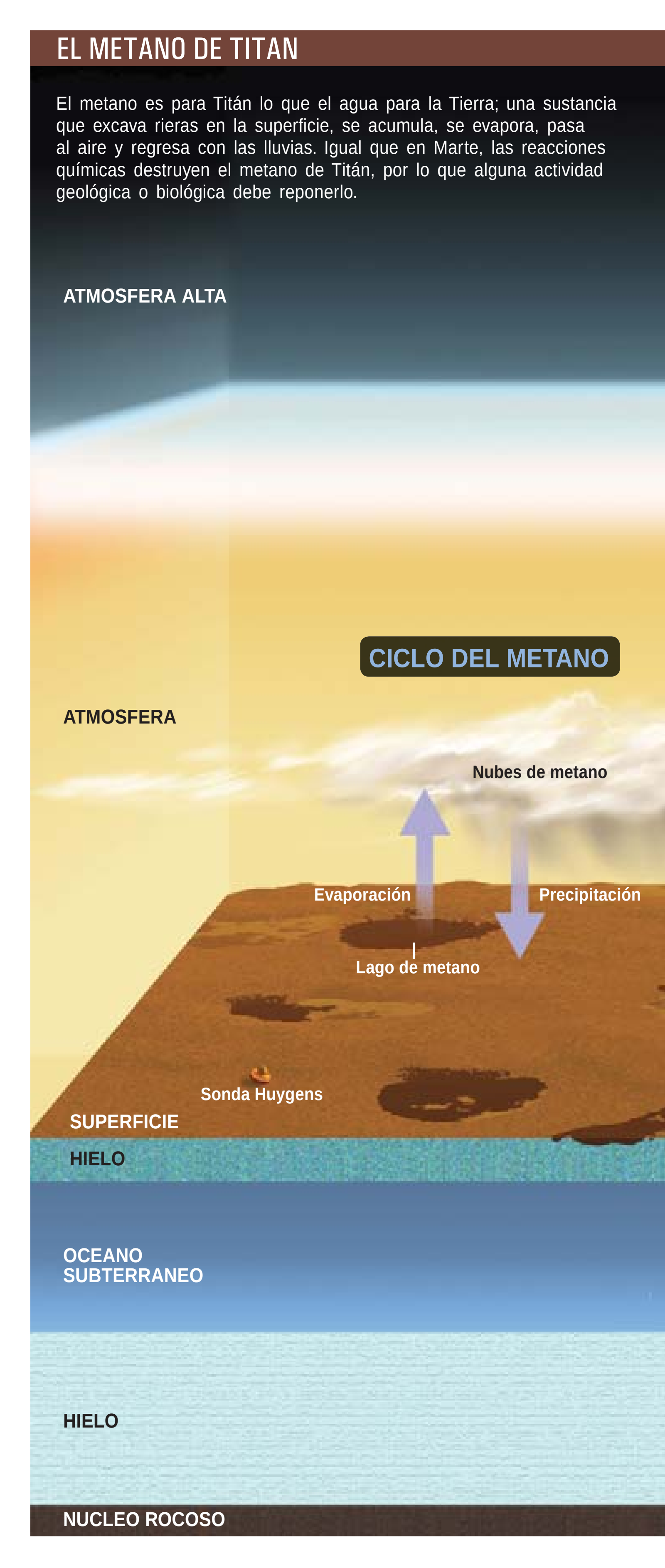
Las observaciones del Mars Express apuntan a una mayor concentración de metano en las regiones con agua helada subterránea. Tanto la hipótesis geológica como la biológica explicarían esta correlación. Los acuíferos situados bajo el hielo ofrecen un hábitat a criaturas vivas y un lugar adecuado para la producción hidrogeoquímica del metano. Sin más datos, cualquiera de las dos posibilidades es igualmente probable.

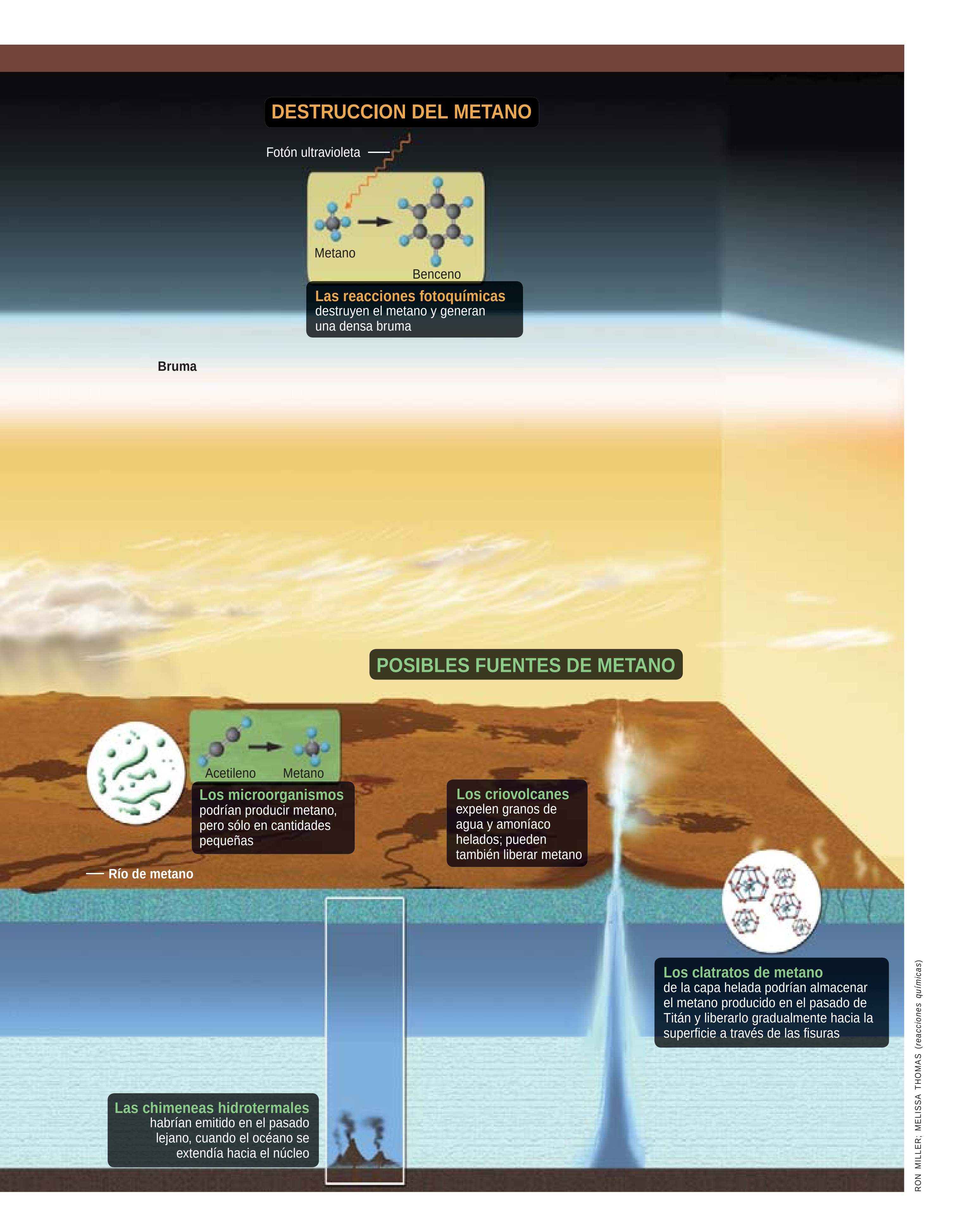
## Un océano titánico

A primera vista, podría pensarse que el metano de Titán tiene una explicación más sencilla, ya que ese satélite se formó en la subnebulosa de Saturno, cuya atmósfera

### EL METANO DE TITAN

El metano es para Titán lo que el agua para la Tierra; una sustancia que excava rieras en la superficie, se acumula, se evapora, pasa al aire y regresa con las lluvias. Igual que en Marte, las reacciones químicas destruyen el metano de Titán, por lo que alguna actividad geológica o biológica debe reponerlo.






RON MILLER; MELISSA THOMAS (*reacciones químicas*)

## EL PROXIMO TODOTERRENO DE LA NASA

El siguiente paso para resolver el problema del metano en Marte lo dará el Laboratorio Científico de Marte, vehículo de la NASA cuyo lanzamiento está previsto para 2009. Sus instrumentos deberían medir las proporciones isotópicas del metano (informará sobre su origen). En sus recorridos buscará compuestos orgánicos (cuya composición indicaría qué procesos químicos o biológicos han creado o destruido el metano).

Cámaras de mástil
Espectrógrafo (para analizar la composición)
Generador termoeléctrico radioisotópico
Antena UHF
Antena de alta ganancia
Estación meteorológica
Detector de radiación
Detector de neutrones (para rastrear el agua subterránea)
Estación de procesado de muestras
Instrumentos de análisis de muestras (para buscar compuestos orgánicos)
Cámara para el descenso
Instrumento de difracción de rayos X (para analizar los minerales)
2 metros
Cámara de aproximación
Instrumentos de análisis de rocas y suelo (dibujo simplificado)

DON FOLEY; FUENTE: NASA/JPL

contiene grandes cantidades de ese gas. Sin embargo, los datos concuerdan mejor con la generación de metano en Titán que con la aportación externa al satélite. La sonda Huygens, de la misión conjunta Cassini-Huygens, de la NASA y de la Agencia Espacial Europea, no halló ni xenón ni criptón en la atmósfera de Titán. Si los planetesimales que compusieron el satélite hubiesen tenido metano, habrían albergado también esos gases nobles pesados. La ausencia de los gases nobles indica que el metano se genera con toda probabilidad en Titán.

Por tanto, la presencia allí de metano resulta tan misteriosa como en Marte. Más incluso, habida cuenta de su cantidad (5 por ciento en volumen). Una fuente probable, al igual que en Marte, es la serpentinización a temperaturas moderadas. Christophe Sotin y sus colaboradores, de la Universidad de Nantes, sostienen que Titán podría encerrar un océano de agua líquida debajo de la superficie. El amoníaco disuelto impediría que se congelase. Según la hipótesis del grupo de Nantes, el océano yace a 100 kilómetros de profundidad bajo de la superficie de Titán y tiene un grosor de 300 a 400 kilómetros. En el pasado, la desintegración de los elementos radioactivos y el calor residual de la formación de Titán podrían haber fundido casi todo el hielo del satélite: el océano quizá llegase hasta el núcleo rocoso.

En estas condiciones, las reacciones entre el agua y la roca habrían liberado hidrógeno gaseoso, que a su vez, al reaccionar con el dióxido y monóxido de carbono, con los granos de carbono y otros materiales carbonáceos, habría generado metano. Según mis cálculos, el proceso sí podría explicar la cantidad de metano observada en Titán. Una vez producido, el metano se habría almacenado en los clatratos estables; los volcanes, de un modo paulatino, o los impactos, de una forma violenta y a ráfagas, lo habrían ido luego liberando.

La detección del gas argón 40 por parte de la sonda Huygens en su descenso a través de la atmósfera de Titán constituye un dato clave. Hablamos de un isótopo que se forma por la desintegración radiactiva del potasio 40, secuestrado en las rocas del núcleo de Titán. Puesto que la vida media radiactiva del potasio 40 es de 1300 millones de años, la pequeña cantidad de argón 40 observada en la atmósfera de Titán nos remite a una liberación lenta de gases procedentes del interior. Las imágenes ópticas y de radar muestran en la superficie signos de criovulcanismo —géiseres de agua y amoníaco helados—, otro indicio de que mana materia desde el interior. Y la superficie de Titán parece bastante joven y desprovista de cráteres, signo de que aflora material. Al ritmo calculado, el afloramiento proporcionaría metano desde el interior del satélite con rapidez suficiente para compensar las pérdidas fotoquímicas. El metano desempeña en Titán la función del agua en la Tierra, con reservas superficiales líquidas, nubes y lluvia, un completo ciclo del metano. Por tanto, se cuenta con pruebas sólidas, más aún que para Marte, de que al metano del interior de Titán no le cuesta salir a la superficie y, por evaporación, incorporarse a la atmósfera.

¿Desempeña la biología algún papel en la creación del metano en Titán? Según Christopher McKay, del Centro Ames de Investigación de la NASA, y Heather Smith, de la Universidad Espacial Internacional de Estrasburgo, y según Dirk Schulze-Makuch, de la Universidad del Estado de Washington, y David Grinspoon, del Museo de

Ciencias Naturales de Denver, el acetileno y el hidrógeno podrían servir de nutrientes de los microorganismos productores de metano, incluso en el frío extremo de Titán (−179 grados centígrados). El proceso biogénico diferiría del mecanismo empleado por las bacterias terrestres y sus análogas de Marte, si existen, en que no necesitaría agua. Antes bien, el medio lo compondrían los hidrocarburos líquidos de la superficie de Titán.

Esta hipótesis presenta un punto débil. Los datos de la Huygens descartan una fuente subterránea de acetileno. Este elemento debe proceder en última instancia del metano de la atmósfera. Se cae en un razonamiento circular: para producir metano con los microorganismos se necesitaría disponer de metano. Es más, el metano es tan abundante en Titán, que los metanógenos tendrían que trabajar a destajo para producir el gas, con el consiguiente agotamiento de los nutrientes.

Ante tales obstáculos, la explicación biológica del metano resulta menos atractiva en Titán que en Marte. No obstante, debe seguirse investigando su habitabilidad. Algunos opinan que podría haber sido, o ser aún ahora, habitable. Recibe luz suficiente para convertir el nitrógeno y el metano en moléculas prebiológicas. Una mezcla subterránea de agua y amoníaco, con algo de metano y otros hidrocarburos, no sería un mal entorno para moléculas complejas o seres vivos. En un pasado lejano, cuando el joven Titán se estaba enfriando todavía, el agua líquida quizá corría por la superficie.

## Comida orgánica

Una medición esencial para determinar las fuentes de metano en Marte y Titán sería la de la razón isotópica del carbono. La vida en la Tierra ha evolucionado con una preferencia por el carbono 12, que requiere menos energía de enlace que el carbono 13. Cuando se combinan los aminoácidos, en las proteínas resultantes escasean los isótopos más pesados. Los organismos de la Tierra contienen de 92 a 97 veces más carbono 12 que carbono 13; para la materia inorgánica, la razón isotópica es de 89,4.

En Titán, sin embargo, la sonda Huygens determinó una razón de 82,3 en el metano, que es inferior, no superior, al valor terrestre de la materia inorgánica. Este hallazgo no corrobora la presencia de vida tal y como la conocemos. Se ha sostenido que la vida pudo haber evolucionado de manera diferente en Titán que en la Tierra, o que la razón isotópica inorgánica quizá sea distinta en Titán.

Se desconoce la razón isotópica del carbono en Marte. Cuesta medirla cuando la concentración del gas es tan baja (una milmillonésima parte de la de Titán). El Laboratorio Científico de Marte, todoterreno de la NASA cuya llegada al planeta se halla prevista para 2010, realizará mediciones precisas de los isótopos del metano y quizá de otros materiales orgánicos. También estudiará muestras sólidas y gaseosas en busca de signos de vida actual o pasada; entre ellos, razones altas de metano con respecto a los hidrocarburos pesados (etano, propano, butano) y la quiralidad (la preferencia por moléculas levógiras o dextrógiras).

Estas cuestiones arrastran otra: ¿por qué la superficie marciana parece carecer de sustancias orgánicas? Aun sin vida, los meteoritos, los cometas y el polvo interplanetario deberían haber depositado compuestos orgánicos durante los últimos 4500 millones de años. Quizá la respuesta se encuentre en los remolinos de polvo, tormentas y saltos de los granos de polvo llevados por el viento. Generan intensos campos eléctricos estáticos que, a su vez, desencadenan la síntesis química del peróxido de hidrógeno. Puesto que se trata de un potente antiséptico, el peróxido de hidrógeno esteriliza rápidamente la superficie: la limpia de compuestos orgánicos. Este oxidante aceleraría también la pérdida local de metano dentro de la atmósfera. Necesitaría, pues, una fuente mayor para explicar las cantidades observadas en la atmósfera marciana.

En resumen, el metano viene a ser el pegamento que mantiene unido Titán de una manera un tanto misteriosa. La presencia de metano en Marte no es menos intrigante, y no sólo porque evoque la posibilidad de que haya vida allí. Las próximas observaciones de Marte y Titán intentarán establecer si estos cuerpos celestes fueron habitables alguna vez. A pesar de que la vida que conocemos produce metano, la presencia de metano no implica la existencia de vida. Por eso importa investigar con detalle, en muestras gaseosas y sólidas, las fuentes, los sumideros y la naturaleza isotópica del metano y de otras moléculas orgánicas y compuestos presentes sólo como trazas. Aun cuando se confirmara que el metano no tiene conexión con la vida, su estudio revelará algunos de los aspectos fundamentales de la formación, historia climática, geología y evolución de Marte y Titán.

## El autor

**Sushil K. Atreya**, docente en la Universidad de Michigan en Ann Arbor, formó parte del equipo científico de las misiones Voyager a los planetas gigantes y de las misiones Galileo, Cassini-Huygens, Venus Express, Mars Express, el Laboratorio Científico de Marte (que se lanzará en 2009) y el Orbitador Polar Juno-Júpiter (para 2011).

## Bibliografía complementaria

DETECTION OF METHANE IN THE ATMOSPHERE OF MARS. Vittorio Formisano, Sushil Atreya, Thérèse Encrenaz, Nikolai Ignatiev y Marco Giuranna en *Science*, vol. 306, págs. 1758-1761; 28 de octubre, 2004.

A SENSITIVE SEARCH FOR $SO_2$ IN THE MARTIAN ATMOSPHERE: IMPLICATIONS FOR SEEPAGE AND ORIGIN OF METHANE. Vladimir A. Krasnopolsky en *Icarus*, vol. 178, n.º 2, págs. 487-492; noviembre, 2005.

EPISODIC OUTGASSING AS THE ORIGIN OF ATMOSPHERIC METHANE ON TITAN. Gabriel Tobie, Jonathan L. Lunine y Christophe Sotin en *Nature*, vol. 440, págs. 61-64; 2 de marzo, 2006.

TITAN'S METHANE CYCLE. Sushil K. Atreya, Elena Y. Adams, Hasso B. Niemann, Jaime E. Demick-Montelara, Tobias C. Owen, Marcello Fulchignoni, Vrancesca Ferri y Eric H. Wilson en *Planetary and Space Science*, vol. 54, n.º 12, págs. 1177-1187; octubre, 2006.

METHANE AND RELATED TRACE SPECIES ON MARS: ORIGIN, LOSS, IMPLICATION FOR LIFE, AND HABITABILITY. Sushil K. Atreya, Paul R. Mahaffy y Ah-San Wong en *Planetary and Space Science*, vol. 55, n.º 3, págs. 358-369; febrero, 2007.



# Origen cromosómico del cáncer

**Para ahondar en la comprensión del cáncer debemos ir más allá del estudio de la función génica y adoptar una perspectiva amplia de lo que ocurre en el interior de la célula**

Peter Duesberg

A principios del decenio de los sesenta, cuando empecé a estudiar el cáncer, se consideraba que la causa de la mayoría, si no todos, los procesos malignos eran los virus. Esa hipótesis se basaba en el descubrimiento de varios virus agentes de tumores o de leucemia: infectaban la célula huésped e insertaban en el genoma celular su material genético vírico, lo que desencadenaba una transformación cancerosa y la proliferación de la célula.

Optimista e ingenuo —era becario posdoctoral—, albergaba la esperanza de que, si se comprendían las bases moleculares de la acción cancerígena de los virus, podríamos desarrollar vacunas para erradicar una de las enfermedades más temidas por la humanidad.

Mi aportación llegó en 1970, cuando, junto con Michael Lai y Peter Vogt, aislamos el gen *src*, supuestamente tumorigénico, en el virus del sarcoma de Rous aviar. En pocos años, mentes científicas más creativas que la mía seguirían esa pista para acabar descubriendo que el ADN normal de los animales —hombre incluido— contenía un gen muy parecido al *src*. Así nació un nuevo modelo del cáncer: un suceso desencadenante, así una mutación en la versión humana de *src*, activaba una función tumorigénica similar a la que posee su homólogo vírico. La capacidad para promover el cáncer de esa bomba de relojería integrada en nuestro propio genoma sirvió para otorgarle el término de "protooncogén". En el momento en que tuviese lugar la mutación, se convertiría en un oncogén en toda regla.

Durante los últimos 30 años ha dominado la tesis de que el origen de todos los tipos de cáncer radicaba en las mutaciones producidas en determinados genes. Sin embargo, a pesar de los intentos que se han acometido —incluidos los nuestros— para demostrar que basta un puñado de oncogenes para transformar células normales en malignas, nadie lo ha conseguido.

Además, el modelo de los oncogenes hace caso omiso de un hecho evidente: si bien es verdad que en las células tumorales se producen mutaciones de genes individuales, no resulta menos cierto que los cromosomas, que contienen miles de genes, se encuentran alterados (duplicados, rotos, reorganizados estructuralmente o completamente ausentes).

Un número creciente de datos sugiere que semejante caos cromosómico no constituye un mero efecto secundario del proceso maligno —como sostiene el modelo predominante, basado en la acción de los oncogenes—, sino la causa directa y la fuerza motriz del cáncer.

Junto con varios colaboradores estadounidenses y europeos venimos investigando esta posibilidad desde hace más de un decenio. También los trabajos recientes de otros investigadores apuntan hacia la idea de que los cambios en el número y la estructura de los cromosomas, y no los operados en genes individuales, bastan para iniciar y mantener un proceso tumoral. El nuevo punto de vista abre interrogantes del máximo interés para el tratamiento y la prevención del cáncer, así como para el diagnóstico de estados precancerosos, cuando se estaría todavía a tiempo de intervenir. Por último, da cuenta de ciertas características de las células cancerosas y de los tumores que la hipótesis de la mutación genética deja sin explicar.

## Especies invasoras

Nuestro grupo de investigación llegó a la teoría cromosómica del cáncer a partir de las propiedades biológicas que caracterizan a una célula humana "normal". La naturaleza se comporta de una manera harto conservadora con los cromosomas, donde se compendia la enciclopedia de la vida. La dotación cromosómica que define a cada especie (cariotipo) persiste estable mientras dure la especie en cuestión. También la

JEN CHRISTIANSEN

reproducción sexual impone la conservación del cariotipo característico de una especie, pues el desarrollo embrionario depende de que exista una conformidad absoluta en los cromosomas: las células que poseen cromosomas alterados o distribuidos de forma incorrecta no suelen ser viables. Una rara excepción, el síndrome de Down, ilustra el daño sistémico que genera la presencia en las células humanas de una copia adicional de un cromosoma, bastante pequeño, el número 21.

Los genes, en cambio, muestran una gran variación dentro de una especie. Por botón de muestra, los polimorfismos de un nucleótido (SNP, de "single-nucleotide polymorfisms"), cambios en la secuencia de ADN que suelen ser benignos, se encuentran diseminados por el genoma de cada uno de nosotros. Se transmiten de padres a hijos.

Sin embargo, las células cancerosas y sus precursoras, menos notorias, violan las leyes de la naturaleza sobre estabilidad de los cariotipos. Mientras que las células humanas normales son diploides (poseen dos copias de los cromosomas que definen nuestra especie), las células de los tumores sólidos son *siempre* aneuploides (han ganado o perdido cromosomas enteros o segmentos cromosómicos). En virtud de esa aneuploidía, el contenido total de ADN de una célula cancerosa aumenta hasta doblar de lejos el de una célula diploide normal o merma hasta casi la mitad del contenido de la célula diploide.

Acontece así que la célula produce cantidades descompensadas de las proteínas cifradas por miles de genes que se han multiplicado o perdido. Tamaño desequilibrio altera la actividad de grupos de enzimas cruciales, incluidas las que intervienen en la reparación o la eliminación del ADN dañado. Desequilibrios que desestabilizan también las estructuras y los mecanismos de regulación celulares. De hecho, el grupo más complejo de proteínas que operan de forma coordinada dentro de una célula y, por tanto, el más vulnerable, es el huso mitótico, que reparte los cromosomas durante la división celular. En breve, una vez instaurada la aneuploidía, los cromosomas terminarán, a buen seguro, por desorganizarse todavía más.

Hallaríamos ahí una explicación de las diversas combinaciones y alteraciones cromosómicas que presentan las células cancerosas de un mismo tumor. Cada célula deviene, en sí misma, una nueva "especie". La propia inestabilidad inherente confiere libertad a las células cancerosas para desarrollar nuevos rasgos y comportamientos (fenotipos). Las células normales, en cambio, están destinadas a desarrollar rasgos predeterminados en función del órgano o tejido al que pertenecen, conforme a una programación estricta, característica de la especie. Con esa licencia para cambiar, una célula aneuploide se va liberando poco a poco de sus responsabilidades "sociales" normales en un organismo pluricelular, multiplicándose con autonomía creciente, a expensas de otras células.

Tomadas en su conjunto, las células cancerosas evolucionan de mal a peor. Durante la progresión de la carcinogénesis, las células comienzan a desarrollar sus propios tamaños, formas, rutas metabólicas y velocidades de crecimiento. De hecho, la definición de cáncer incluye la adquisición por parte de la célula de una capacidad antinatural para invadir los tejidos colindantes y desplazarse hacia órganos lejanos, o metástasis.

La amplia variabilidad de las células cancerosas y la enorme diversidad de sus fenotipos constituyen las razones principales por las que el cáncer se ha mantenido como un problema inabordable, desde el punto de vista científico y terapéutico. Al poco de administrar un nuevo agente antitumoral, empiezan a crecer variantes celulares resistentes al fármaco. Luchar contra esas entidades con un medicamento viene a ser como enfrentarse a una fauna completa de animales salvajes con una trampa sólo para cocodrilos.

Sin embargo, en todos los casos de cáncer, el repertorio completo de células malignas procede de una célula progenitora inestable. Ese origen "clónico" del tumor se demuestra por la presencia —en todas, o casi todas, sus células— de reorganizaciones cromosómicas tan singulares, que no podrían haber surgido de forma independiente. Deben haberlas heredado de un ancestro común. El desafío, por tanto, consiste en encontrar una teoría que explique el modo en que una célula normal, de entre los billones que constituyen un cuerpo humano, se torna inestable (en cuanto a la dotación cromosómica y al fenotipo) y da origen a un cáncer letal.

Hasta hace unos 50 años, la mayoría de los oncólogos pensaban que el origen del cáncer radicaba en los propios cromosomas aberrantes. La idea la avanzaron, en las postrimerías del siglo XIX y principios del XX, David von Hansemann y Theodor Boveri. Mientras estudiaba el cáncer en Berlín, von Hansemann descubrió que todos los cánceres presentaban cromosomas anormales. A través de la observación del desarrollo embrionario de los erizos de mar, Boveri, biólogo de Würzburg, dedujo que, en el interior de las células, los cromosomas constituían los vehículos de la información hereditaria. Llegó a tal conclusión tras observar la degeneración celular desencadenada a raíz de un fallo durante la división celular con la rotura consiguiente de un cromosoma o el reparto irregular de copias enteras entre las dos células hijas. Boveri vinculó a algunos de los embriones malformados con tumores. En 1914, predijo que la pérdida o ganancia de determinados cromosomas provocaba el cáncer.

Esa teoría perdió apoyo medio siglo después. Con la técnica disponible, no se podían detectar tales patrones en los cariotipos heterogéneos y caóticos de las células cancerosas, sobre todo en las que habían alcanzado ma-


## Resumen/*Un ciclo celular vicioso*

- La teoría predominante sobre el cáncer culpa a las mutaciones en genes reguladores que desarbolan los controles celulares. En cambio, ignora la importancia de las alteraciones cromosómicas que se observan en todas las células tumorales.
- El autor argumenta que estas mutaciones cromosómicas, que provocan un desequilibrio génico en masa, bastan para desencadenar la inestabilidad celular que conlleva alteraciones cromosómicas aún mayores; asimismo, dan cuenta de las propiedades de las células malignas cuya explicación trasciende las posibilidades de la actividad de determinados genes.

yor grado de malignidad. Ante la ausencia de pruebas consistentes de cambios cromosómicos, se suponía que aquellos desconcertantes cariotipos cancerosos constituían meras consecuencias del proceso maligno, que se debía a otro factor oculto.

Sin embargo, aunque ignorados en gran parte, algunos datos siguieron respaldando la importancia de la aneuploidía en la génesis y la progresión del cáncer. De hecho, los médicos utilizan hoy todavía el grado de aneuploidía para determinar el potencial cancerígeno de células anómalas obtenidas en biopsias de cuello de útero, próstata, hígado, estómago, garganta, mama y otros tejidos. Una vez reputado canceroso un crecimiento anormal, o neoplasia, se considera también indicio de agresividad un grado elevado de aneuploidía celular.

Más aún, las nuevas técnicas han permitido reabrir la cuestión sobre la posibilidad de detectar cambios cromosómicos específicos en células cancerosas. Los investigadores comienzan a descubrir esos patrones buscados durante tanto tiempo. Los propios defensores de los oncogenes, que estudian los efectos de la aneuploidía en tumores reales, han proporcionado resultados que apuntan hacia las alteraciones cromosómicas, y no a las mutaciones de genes discretos, como las impulsoras de los procesos malignos [*véase* "Las raíces del cáncer" por W. Wayt Gibbs; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2003].

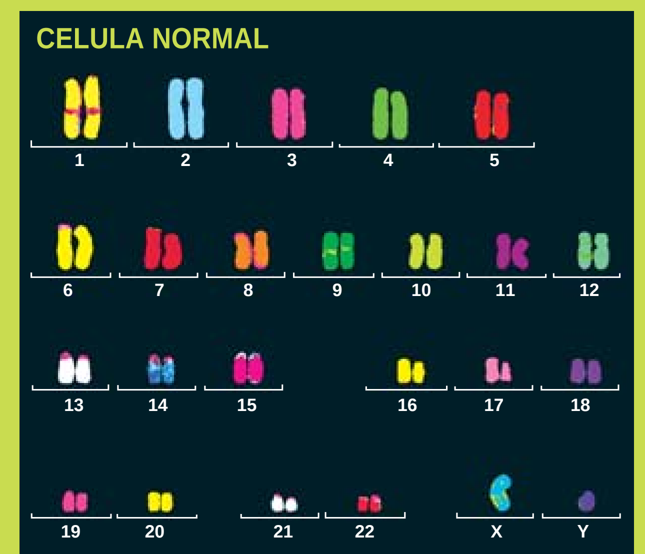
Intrigados por la aparición de esos resultados en el curso del último decenio, así como por el potencial de las alteraciones cromosómicas para la generación de nuevos fenotipos celulares —que guarda semejanza con la aparición de nuevas especies en la naturaleza—, mis colaboradores y yo nos propusimos desentrañar la inestabilidad inherente a las células cancerosas. Nos referimos a la inestabilidad responsable del caos que, en última instancia, provocó el abandono de la teoría cromosómica original del cáncer.

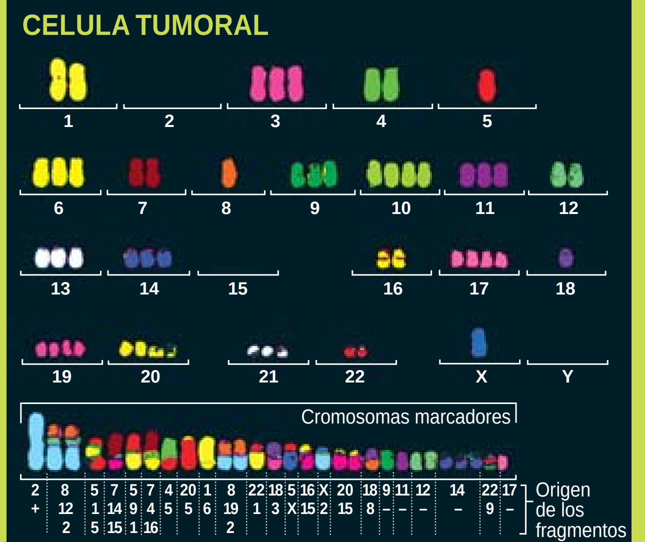
## Causas y efectos

Nuestra estrategia se basó en la recopilación y el análisis de las características de la carcinogénesis menos coherentes con la teoría predominante de la mutación génica. Esperábamos que las excepciones a la regla vigente nos condujeran a una regla mejor. Por fin, identificamos seis características del cáncer cuya justificación trasciende las mutaciones génicas, aunque sí admite explicación mediante alteraciones cromosómicas. Contábamos con los elementos necesarios para la construcción de una teoría vertebrada.

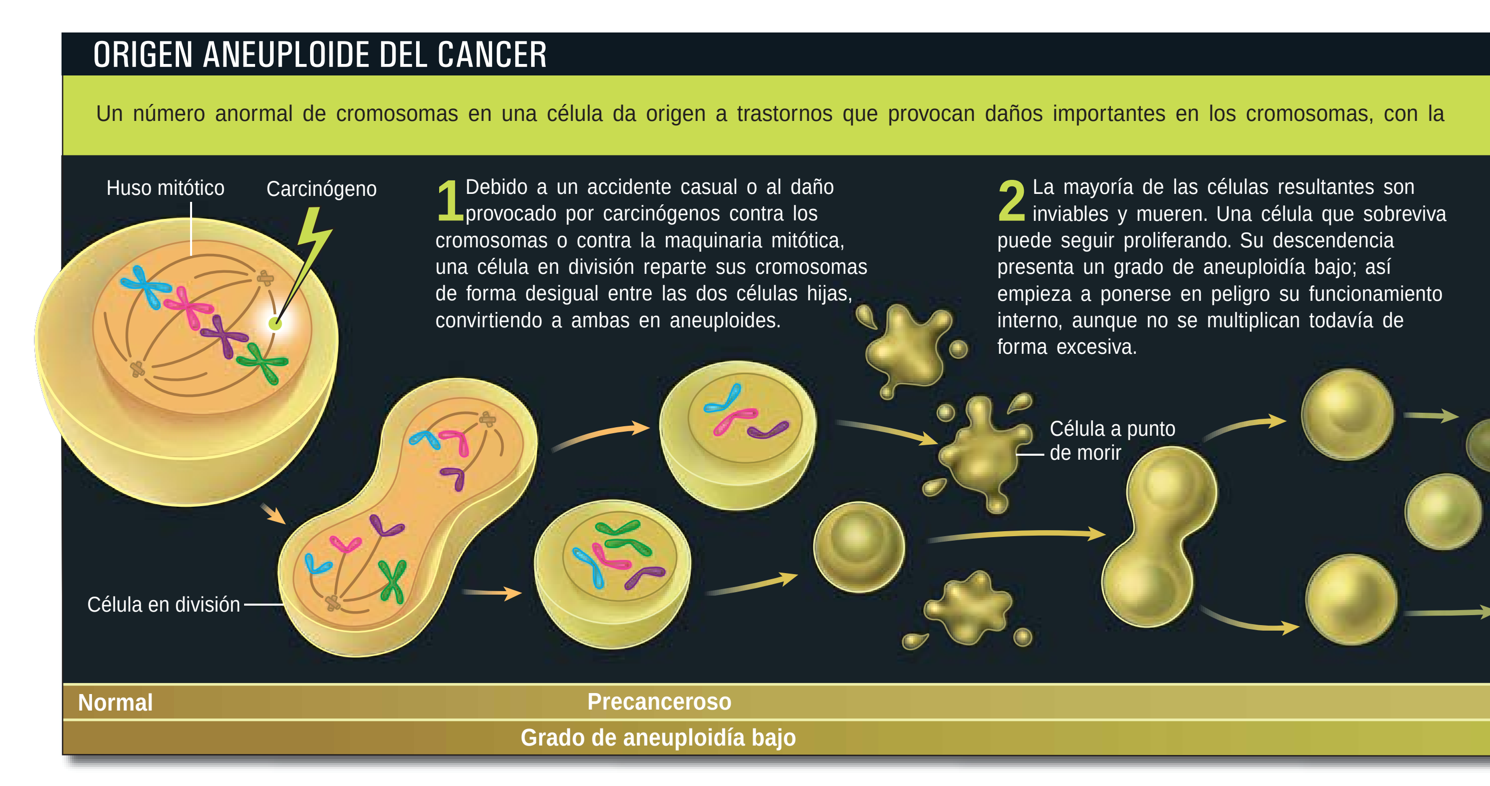
**El riesgo de cáncer aumenta con la edad**. Muy extendido, el cáncer afecta a una de cada tres personas en algún momento de su vida, sobre todo a partir de los 50 años, que es cuando se disparan las probabilidades de padecer un proceso maligno. En buena medida, el cáncer es una enfermedad de ancianos.

Sin embargo, según la hipótesis que centra el origen del cáncer en las mutaciones génicas, la enfermedad debería ser común en los recién nacidos. Si, tal y como propone esa doctrina, se necesitasen cerca de media docena de mutaciones en genes cruciales para iniciar un proceso maligno, algunas de esas mutaciones se irían acumulando, a través de las generaciones, en los genomas de numerosos individuos, al igual que los SNP. De ese modo, un bebé heredaría de su madre, por ejemplo, tres de las seis hipotéticas mutaciones necesarias para el cáncer de colon y dos de su padre; por tanto, presentaría un riesgo altísimo de padecer cáncer tras sufrir la sexta mutación que falta en cualquiera de los miles de




ORDEN Y ANARQUIA. La dotación cromosómica de una célula humana normal, o cariotipo (*izquierda*), incluye los 23 pares de cromosomas distintivos. Una célula tumoral, en cambio, exhibe un cariotipo irregular o aneuploide (*derecha*): algunos cromosomas aparecen incompletos, otros acompañados de copias extra y muchos de ellos han intercambiado fragmentos entre sí. Entre éstos se encuentran los cromosomas marcadores, cuyos reordenamientos estructurales característicos se observan en todas las células del tumor; dan una idea de los cambios operados en la célula que incoó el cáncer. Los números que aparecen debajo de cada uno especifican el origen de sus fragmentos; los signos más y menos identifican a los mayores o menores de lo habitual.




millones de células del colon. Algunos bebés podrían incluso nacer con cáncer de colon tras haber heredado de sus progenitores las seis hipotéticas mutaciones que provocan este tipo de cáncer.

Pero el cáncer de colon nunca se observa en niños. Incluso los ratones transgénicos, así modificados para que desde su nacimiento sean portadores de un repertorio de mutaciones carcinogénicas, viven y se reproducen felizmente; la probabilidad de que desarrollen tumores no es mayor que la de los ratones normales.

Algunos defensores de la teoría de la mutación sostienen que, excepto en los casos raros de predisposición genética hacia el cáncer (mutaciones oncogénicas congénitas), todos los cambios génicos supuestamente causantes de procesos malignos deben adquirirse tras el nacimiento. Lo que entraña que, durante la vida de un individuo, la velocidad natural de mutación génica debe ser mayor de lo habitual, que es de un cambio en un gen por cada millón o por cada 10 millones de células (es decir, una mutación por cada $10^6$ o $10^7$ generaciones de células).

Curiosamente, entre las raras excepciones a la "ancianidad" del cáncer se encuentran los niños con una aneuploidía congénita, como el síndrome de Down, o los que han heredado síndromes de inestabilidad cromosómica, como la aneuploidía en mosaico variegada (MVA, de "mosaic variegated aneuploidy"), que provoca un retraso mental grave. Los defectos en el ensamblaje del huso mitótico en las células de los niños con MVA dan lugar a aneuploidías aleatorias diseminadas por el organismo; casi la tercera parte desarrollan leucemia o cánceres sólidos atípicos.

Haber nacido aneuploide, o con propensión a la aneuploidía, acelera los procesos que conducen al cáncer. De hecho, la inestabilidad inherente a las células aneuploides explicaría por qué la mayoría de los embriones aneuploides —tal y como observó Boveri un siglo atrás— serían inviables y, en consecuencia, por qué los recién nacidos no padecen cáncer y por qué el cáncer no se hereda.

**Los carcinógenos tardan mucho tiempo en provocar el cáncer**. Se ha demostrado que numerosas sustancias y radiaciones resultan carcinogénicas en animales o dan origen a cánceres laborales o espontáneos en humanos. Pero ni siquiera los carcinógenos más potentes en el

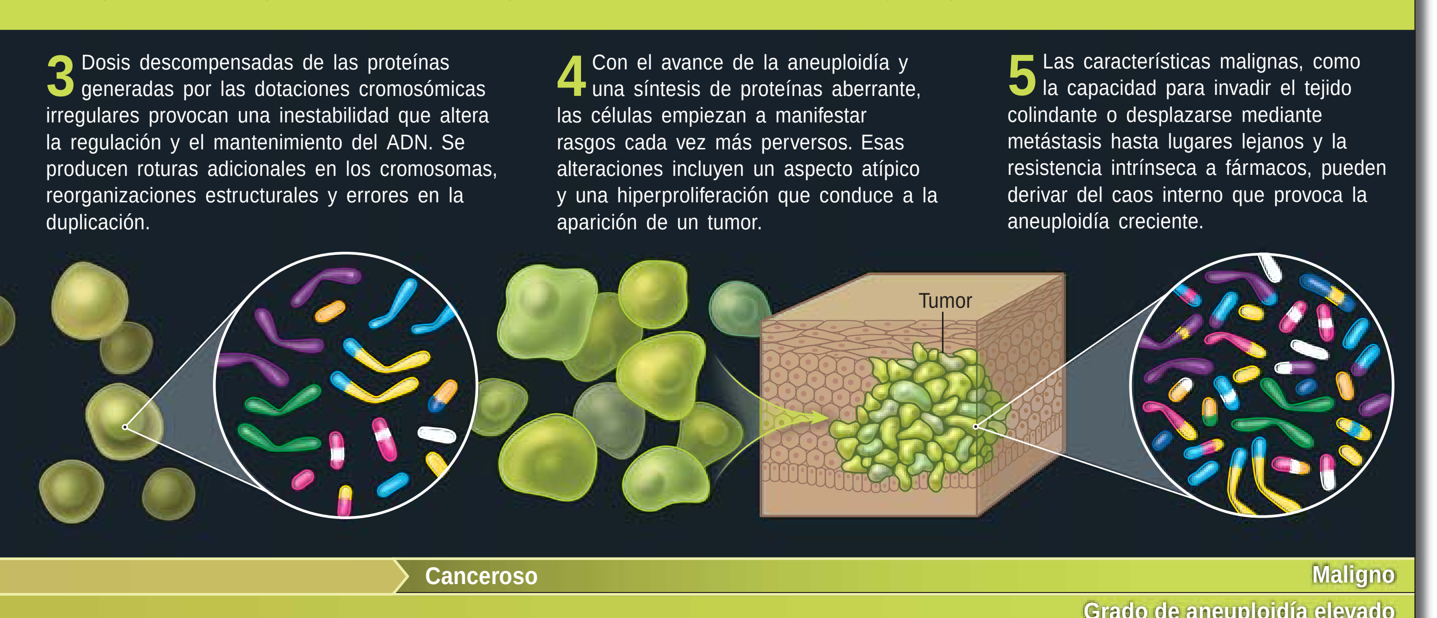
## El autor

**Peter Duesberg** enseña biología molecular y celular en la Universidad de California en Berkeley, donde inició en 1964 su carrera de virólogo. Seis años después aisló el primer oncogén a partir del virus del sarcoma de Rous; también obtuvo la estructura genética del virus completo. Hizo lo mismo con otros 10 virus causantes de sarcoma y leucemia en ratones y aves. En 1987, sus trabajos con retrovirus le llevaron a la conclusión de que el VIH constituye sólo un convidado de piedra y que el sida resulta de la exposición a sustancias químicas y de la malnutrición. Sus investigaciones actuales con los virus cancerígenos le han convencido de que las mutaciones génicas individuales no bastan para provocar el cáncer.

***Nota del Editor:*** Es posible que el autor, Peter Duesberg, virólogo de extenso predicamento, resulte conocido a los lectores por su hipótesis de que el VIH no es el causante del sida. La comunidad biomédica ha desmentido rotundamente esa afirmación en numerosas ocasiones. Por el contrario, su teoría cromosómica del cáncer, pese a ser objeto de controversia, la están investigando otros científicos de primera línea. Por ello hemos invitado a Duesberg para que la explique aquí. De ninguna manera debe considerarse este artículo una muestra de apoyo por parte de *Investigación y Ciencia* a sus teorías sobre el sida.

JEN CHRISTIANSEN

desorganización consiguiente. En cada nueva generación, aumentan la inestabilidad y malignidad de las células resultantes.




ápice de su dosis tolerable provocan cáncer de inmediato. Antes bien, la enfermedad se manifiesta tras un período de demora que puede durar años o decenios.

En cambio, cuando a las bacterias se les suministran sustancias promotoras de mutaciones génicas, las células comienzan a exhibir fenotipos nuevos en horas; en organismos de mayor tamaño, como las moscas, el efecto se observa en un plazo de días.

Por tanto, un modelo basado en las mutaciones génicas no explica por qué las células expuestas a agentes carcinogénicos se convierten en células cancerosas; se trata de un proceso similar a la conversión de un volcán submarino en isla, que ocurre sólo tras un gran número de erupciones invisibles.

**Los carcinógenos, provoquen o no mutaciones en los genes, inducen aneuploidía**. Los expertos han buscado los efectos génicos inmediatos que los agentes carcinogénicos causan en las células, con la esperanza de hallar mutaciones en genes cruciales. Sin embargo, se han encontrado con que algunos de los carcinógenos conocidos más potentes no inducen ninguna mutación. Los ejemplos incluyen el amianto, alquitrán, hidrocarburos aromáticos, níquel, arsénico, plomo, prótesis de plástico o metálicas implantadas, colorantes, uretano y dioxinas.

Se ha descubierto, además, que la dosis de carcinógeno necesaria para iniciar el proceso que al cabo de unos años desencadenará un tumor maligno es menos de una milésima de la dosis que se requiere para mutar cualquier gen específico. En todos los casos, los cromosomas de las células tratadas con dosis cancerígenas de carcinógenos eran inestables, es decir, mostraban una tasa de alteración y rotura superior a la normal.

De los resultados expuestos se desprende que los carcinógenos actúan como aneuploidógenos. Y no como mutágenos. La teoría de la mutación génica nunca ha conseguido explicar el mecanismo utilizado por los carcinógenos no mutagénicos para inducir el cáncer. Cabe incluso la posibilidad de que los carcinógenos mutagénicos desencadenen el cáncer provocando aneuploidía mediante la destrucción directa o la fragmentación de los cromosomas. (La radiación, por ejemplo, induce mutaciones por vía indirecta; primero rompe la hebra de ADN y, luego, las proteínas encargadas de la reparación celular tratan de reparar el daño, pero introducen errores o reordenamientos en la secuencia de nucleótidos.)

Los carcinógenos no mutagénicos, así los hidrocarburos aromáticos, siguen un mecanismo en su producción del fenómeno de la aneuploidía. Destruyen en el interior de la célula los polímeros de microtúbulos que durante la mitosis separan los cromosomas duplicados de forma simétrica. En conclusión, el denominador común de los carcinógenos parece estribar en la capacidad para iniciar una aneuploidía aleatoria.

**Se observan patrones de aneuploidía en tumores distintos**. Si la aneuploidía fuese sólo un efecto secundario del cáncer, resultarían aleatorias las alteraciones cromosómicas observadas en los tumores de personas distintas. Sin embargo, se han descubierto, mediante dos técnicas de tinción cromosómica (hibridación genómica comparativa e hibridación fluorescente *in situ*), ciertos patrones característicos en el mar de caos que impera en las células tumorales. Ambas técnicas se basan en la señalización y el seguimiento de fragmentos cromosómicos, mediante sondas específicas de ADN coloreadas. Se obtiene una imagen de todos los fragmentos cromosómicos que se han ganado, perdido o reorganizado en el interior de una célula.

Numerosos investigadores han hallado casos de aneuploidías “no aleatorias”, alteraciones cromosómicas comunes de la mayoría de los cánceres de un tipo determinado (de mama o de cuello uterino, por ejemplo), tal y como

predecía la teoría cromosómica del cáncer originaria. En 2006, un grupo del Hospital Universitario Karolinska de Estocolmo publicaba un estudio de células procedentes de 10 pacientes con linfoma de Burkitt; habían descubierto frecuentes traslocaciones (intercambios de fragmentos cromosómicos) que afectaban a los cromosomas 3, 13 y 17, así como pérdidas o ganancias específicas en segmentos de los cromosomas 7 y 20.

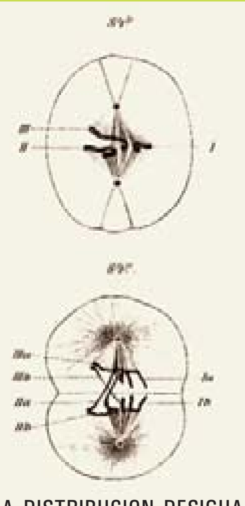
Dado que esos patrones observados en las células tumorales de individuos distintos son específicos del tipo de tejido en que se origina el cáncer, pueden representar los cambios cromosómicos esenciales que se necesitan para superar las restricciones programadas en el desarrollo de la célula progenitora. Por tanto, esos cambios constituirían las alteraciones mínimas necesarias para que una célula aneuploide viable de ese tipo empiece a deslizarse por la pendiente que le llevará a convertirse en una célula neoplásica.

Además de tales patrones específicos para un tipo de cáncer, varios grupos de investigación han identificado cambios cromosómicos indicativos del estadio en que se encuentra el cáncer, su potencial metastásico e incluso su resistencia a fármacos. El equipo del Karolinska descubrió que las traslocaciones observadas en un segmento del cromosoma 17 y las ganancias en regiones de los cromosomas 7 y 20 iban asociadas a la resistencia contra las medicinas.

A medida que se han venido desentrañando las disfunciones que se derivan de esas aneuploidías específicas del cáncer, multitud de estudios sobre la cantidad de transcritos génicos y proteínas que fabrican las células cancerosas han demostrado que, en numerosos casos, las proteínas codificadas por los supuestos oncogenes específicos se sintetizan en la misma cantidad que en las células normales.

Detengámonos en uno de esos trabajos. Llevado a cabo en fecha reciente por un equipo de investigadores estadounidenses e israelíes, se proponía determinar los niveles proteicos en células de cáncer de colon; descubrieron que un gran número de proteínas se sintetizaban en cantidades por encima o por debajo de lo normal. En verdad, alcanzaban unos niveles que se correspondían con los cambios producidos en el contenido de ADN total en el interior de la célula. A mayor grado de aneuploidía, mayores eran los desequilibrios proteicos observados y mayor la progresión de la célula hacia el estado canceroso. El ejemplo viene a respaldar la hipótesis aneuploídica: mediante el aumento o recorte de la dotación celular normal de miles de genes a la vez, la aneuploidía da origen a fenotipos malignos.

**Determinados aspectos no potencian la supervivencia del cáncer**. Algunas de las características habituales y temibles del cáncer no confieren ninguna ventaja competitiva para la supervivencia de un tumor. Nos referimos, entre ellas, a la resistencia intrínseca contra los fármacos desconocidos por el tumor, o la metástasis, que no ayuda a que las células tumorales compitan con las células normales en su lugar de origen. Las mutaciones génicas individuales, raras, se conservarían de forma selectiva en las células tumorales sólo si la mutación fuese beneficiosa; por tanto, la probabilidad de que un tumor sin tratar se vuelva resistente a un fármaco por medio de mutaciones génicas aleatorias es prácticamente nula.

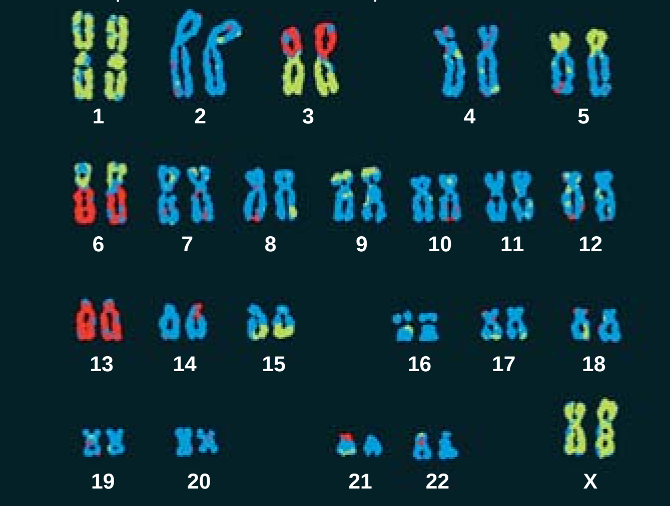


1. LA DISTRIBUCION DESIGUAL de los cromosomas durante la división de las células embrionarias de un erizo de mar queda ilustrada en los dibujos realizados en 1888 por Boveri, quien atribuyó la alteración observada en esa secuencia a la actividad "defectuosa" de las "fibras del huso mitótico".

## ARGUMENTO A FAVOR DE LA ANEUPLOIDIA

A principios del siglo XX, Theodor Boveri propuso que el cáncer se originaba a partir de las alteraciones cromosómicas. Apoyábase en su estudio sobre el desarrollo de los erizos de mar (*izquierda*). El biólogo alemán predijo que la mayoría de las células aneuploides serían inviables pero que determinadas ganancias, pérdidas o reorganizaciones cromosómicas conferirían a la célula y a sus descendientes la facultad para transformarse y multiplicarse de un modo que podría acabar en cáncer. Por tanto, esas alteraciones características se observarían en la mayoría de los cánceres originados a partir del mismo tipo de tejido. Hoy, las técnicas que permiten hacer un seguimiento de fragmentos específicos del ADN comienzan a sacar a la luz cambios cromosómicos comunes de los tumores e incluso de las células precancerosas del mismo tipo en personas distintas (*derecha*). Si la aneuploidía fuese sólo efecto y no causa de la transformación de las células cancerosas, resultaría poco probable que esos patrones surgieran de forma aleatoria; por ello se considera que respaldan una nueva teoría cromosómica del cáncer.

2. LOS CAMBIOS CROMOSOMICOS observados en células de cáncer de cuello uterino procedentes de 30 pacientes mostraron ciertos patrones comunes cuando se resaltaron las regiones en las que se había perdido (*rojo*) o añadido (*verde*) material génico, como en la imagen de uno de los casos mostrada en la figura. Se apreciaron ganancias específicas del cromosoma 3 en 23 casos; aparecieron en los tumores que iban camino de convertirse en un carcinoma invasivo. Las adiciones al cromosoma 1 y las pérdidas en los cromosomas 2, 3 y 4 se observaron en un número de casos que oscilaba entre un tercio y la mitad del total.



Los cromosomas, en cambio, de mayor tamaño y portadores de miles de genes, quedarían retenidos en función de su contribución a la hora de conseguir un fenotipo específico del cáncer, con lo que se arrastrarían también numerosos rasgos no seleccionados. De hecho, la existencia de alteraciones cromosómicas específicas relacionadas con la resistencia a fármacos o la metástasis avala esa posibilidad. En conjunto, las células tumorales muestran un rápido desarrollo de todo tipo de rasgos nuevos.

**Las células cancerosas se transforman con mayor celeridad que los genes**. Las células tumorales generan fenotipos nuevos y pierden los viejos con vertiginosa rapidez. Dada una tasa de mutación normal (en más del 90 por ciento de los cánceres la velocidad de mutación génica de las células no se acelera), la probabilidad de que un gen mute para producir un fenotipo novedoso con la rapidez que se observa en las células cancerosas es, de nuevo, muy limitada.

Para comprobar la hipótesis de que las alteraciones de cariotipos enteros originarían esos cambios tan prestos, nuestro grupo ha estudiado las variaciones cromosómicas presentes en células humanas aneuploides de cáncer de mama y de colon. Hemos determinado también la velocidad con que las células adquieren la resistencia a fármacos tóxicos.

Observamos cambios en el cariotipo con una velocidad de al menos uno por cada 100 generaciones; los cambios que conferían resistencia a fármacos se desarrollaban a una velocidad que oscilaba entre uno por cada 1000 generaciones y uno por cada 100.000 generaciones. En breve, se precisa menos tiempo para que las células aneuploides remodelen sus cromosomas y sus fenotipos que para que las mutaciones alteren los genes.

Esos y otros experimentos similares demostraron que cuanto más aneuploides sean las células cancerosas, con mayor prontitud aparecen las alteraciones cromosómicas. Semejante patrón presta su apoyo a la tesis de que la inestabilidad cromosómica observada en las células cancerosas está catalizada por la propia aneuploidía. Una vez puesto en marcha este círculo vicioso, el hecho de que cada célula genere de forma aleatoria sus propios fenotipos nuevos explicaría la observación que realizó hace decenios Leslie Foulds, del Real Hospital del Cáncer en Londres: “No hay dos tumores exactamente iguales... aun cuando se originen a partir del mismo tejido... y se hayan inducido de manera experimental de la misma forma”. Esa individualidad constituye otra de las propiedades del cáncer que no se puede explicar mediante la actividad o inactividad de genes específicos, pues éstas deberían provocar efectos reproducibles en cada caso y en cada célula.

Puesto que todas y cada una de las características de la carcinogénesis que no se pueden explicar mediante la teoría de la mutación génica guardan relación con alteraciones cromosómicas, proponemos una teoría cromosómica del cáncer revisada que tome en consideración esa inestabilidad inherente.

## Dinámica letal

Cuando se aborda la patología del cáncer desde una óptica cromosómica, los carcinógenos, los síndromes genéticos raros y los errores mitóticos accidentales inician la carcinogénesis mediante la inducción de aneuploidías aleatorias. Al desequilibrar miles de genes y las proteínas que éstos expresan, la aneuploidía crea el escenario para una aneuploidía todavía mayor. Ese trastorno autocatalítico y dinámico se convierte en una fuente estable de variabilidad a partir de la cual la selección de combinaciones cromosómicas egoístas acaba generando células neoplásicas viables y competitivas. Aparecen así nuevas especies celulares —aunque parásitas— con cariotipos inestables.

Una vez iniciada la progresión del cáncer, la remodelación aleatoria de los cromosomas genera rasgos fortuitos entre los que se incluyen propiedades letales, tales la resistencia a los fármacos y la metástasis. Por tanto, las perspectivas de éxito de un tratamiento oncológico basado en fármacos individuales, sobre todo en los dirigidos contra genes concretos, no son buenas. En fecha reciente, algunos investigadores han propuesto combatir al fuego con fuego: es decir, combatir el cáncer con tratamientos que aceleran el daño al ADN cromosómico y la aneuploidía; se pretende que las células tumorales se vuelvan tan inestables, que dejen de ser viables. La estrategia podría funcionar en un tumor pequeño y circunscrito. Sin embargo, sería una técnica difícil de controlar.

Con todo, la lenta progresión desde las etapas tempranas de la aneuploidía hasta una neoplasia agresiva ofrece un amplio margen para la detección y extirpación de un posible cáncer antes de que entre en un estadio neoplásico. Asimismo, los cánceres precoces podrían distinguirse de tumores benignos con morfología idéntica mediante la detección de aneuploidía. En los tumores más avanzados, los patrones cromosómicos asociados con la resistencia a fármacos o con la facultad para producir metástasis guiarían la elección del tratamiento.

Por fin, la detección en alimentos, medicamentos y en el medio de sustancias que deterioran los cromosomas mejoraría la prevención del cáncer mediante la identificación de carcinógenos capaces de inducir aneuploidía. Albergo la esperanza de que el círculo se complete. Confío en que los expertos terminen por descifrar los rasgos básicos de esta temible enfermedad y desarrollen métodos de prevención, tratamiento e incluso cura.

### Bibliografía complementaria


DEBATE SURGES OVER THE ORIGINS OF GENOMIC DEFECTS IN CANCER. Jean Marx en *Science*, vol. 297, págs. 544-546; 26 de julio, 2002.

THE SIGMOIDAL CURVE OF CANCER. Roberto P. Stock y Harvey Bialy en *Nature Biotechnology*, vol. 21, págs. 13-14; enero, 2003.

THE CHROMOSOMAL BASIS OF CANCER. Peter Duesberg y col. *en Cellular Oncology*, vol. 27, n.º 5-6, págs. 293-318; 2005.

CANCER DRUG RESISTANCE: THE CENTRAL ROLE OF THE KARYOTYPE. Peter Duesberg y col. en *Drug Resistance Updates*, vol. 10, n.º 1-2, págs. 51-58; 2007.

# Un borrador cuántico doméstico

Podemos realizar en el hogar un experimento donde se ponga de manifiesto uno de los efectos más extraños de la mecánica cuántica. El material necesario se obtiene con facilidad

UN BORRADOR CUANTICO, que elimina información sobre fenómenos que ya han ocurrido, da la impresión de influir sobre acontecimientos pasados. En un ejemplo fantasioso, un gato podría haber rodeado un árbol por ambos lados a la vez si se hubiese borrado la información acerca del lado por donde pasó.

RACHEL HILLMER Y PAUL KWIAT

La mecánica cuántica se significa por la radical extrañeza del mundo que describe. Infringe nociones de sentido común que constituyen la esencia misma de nuestra percepción normal de la realidad: permite la coexistencia de alternativas que se contradicen —un cuerpo puede tomar al mismo tiempo dos rutas diferentes—; veda que los cuerpos tengan al mismo tiempo posiciones y velocidades definidas con exactitud; somete a los objetos y acontecimientos que observamos a una aleatoriedad imposible de erradicar, que nada tiene que ver con las imperfecciones del instrumental o de nuestra vista.

Ha sido barrido el mundo fiable, ese mundo donde los átomos y partículas “se portan rectamente” y se mueven como bolas de billar sobre el paño verde de la realidad. Los átomos y las partículas atómicas se comportan (en ocasiones) como si fueran ondas, se dispersan por una región y forman, al entrecruzarse, patrones de interferencia.

Pero en nuestra vida cotidiana ese mundo desconcertante parece remoto. Los efectos cuánticos se evidencian en sistemas ultramicroscópicos, como el de los electrones retenidos en los confines de un átomo. Tal vez sepamos, en abstracto, que las técnicas más avanzadas y modernas descansan en fenómenos cuánticos y que en los laboratorios se han demostrado diversas anomalías cuánticas. Pero la única forma de verlos en casa es en algún programa científico de la televisión. ¿O no?

No. En el recuadro “Borrador cuántico en casa” indicamos cómo se monta un experimento que efectúa un “borrado cuántico”, operación que entraña una de las características más extrañas e insospechadas de la mecánica cuántica: la capacidad de acometer acciones que cambian la esencia misma de nuestra interpretación de acontecimientos pasados.

Antes de que expliquemos lo que eso significa y de que esbocemos el experimento propiamente dicho, en interés de la verdad hemos de hacer una salvedad. Los motivos



luminosos que se observan cuando el experimento se lleva a cabo correctamente *pueden* explicarse considerando que la luz es una onda clásica: no es preciso recurrir a la mecánica cuántica. En este aspecto el experimento “hace trampa” y no demuestra de forma plena e indudable la naturaleza cuántica del efecto observado.

Sin embargo, los fotones que componen la onda luminosa sí se atienen a las reglas cuánticas, con todas sus peculiaridades. Aunque sólo podríamos demostrarlo enviando los fotones a través del aparato de uno en uno y detectándolos de esa misma manera. Tal proceder excede de las posibilidades del experimentador aficionado. No obstante, la observación de las configuraciones que se obtienen en el experimento, así como la consideración de lo que significan en términos de fotones sueltos, permite atisbar de primera mano el exótico mundo cuántico.

El experimento se explica con detalle en las dos páginas siguientes. Cuanto sigue (y continúa tras ellas) se ocupa de la ciencia de los borradores cuánticos en general. Esta explicación ayudará al lector a comprender qué demuestra el borrador cuántico doméstico, aunque es posible que desee repasarla una vez visto lo que hace ese tipo concreto de borrador.

## Lo que borra un borrador cuántico

Una de las extrañas peculiaridades de la mecánica cuántica concierne a la conducta que exhibe alguna cosa: tal comportamiento puede depender de lo que estemos tratando de averiguar sobre ella. Así, un electrón puede comportarse como una partícula o como una onda, dependiendo del montaje experimental al que sea sometido. Así, en ciertas situaciones presentará un comportamiento “de partícula” si determinamos la trayectoria que ha seguido y un comportamiento ondulatorio cuando no ocurra tal.

Una demostración típica de esta dualidad nos la ofrece el experimento de las dos rendijas. (El borrador cuántico doméstico se parece a este experimento en que la luz sigue dos rutas, pero no tiene dos rendijas.) Una fuente emite partículas —electrones, por ejemplo— hacia una pantalla con dos rendijas, que pueden atravesar. Las partículas llegan finalmente a una segunda pantalla, donde cada una produce una mancha. El punto donde cada una hace impacto es hasta cierto punto impredecible; pero, al irse acumulando por millares, las manchas van configurando un motivo definido y predecible. Cuando se dan las condiciones adecuadas para que las partículas se comporten como ondas, el resultado es un patrón de interferencia; en este caso, una serie de difusas franjas de luz en las que cae la mayoría de las partículas, mientras que son muy pocas las que lo hacen en los huecos que las separan.

Las partículas sólo generan el patrón de interferencia si cada partícula pudo haber viajado a través de cualquiera de las dos rendijas y no hay forma de saber con certeza por cuál lo hizo. Se dice entonces que las dos rutas son indistinguibles y cada partícula ha actuado como si hubiera pasado a través de las dos. Según la forma moderna de entender la mecánica cuántica, la interferencia se da cuando se combinan, de esa forma, dos alternativas indistinguibles.

La coexistencia de dos o más alternativas se denomina “superposición”. Erwin Schrödinger resaltó el carácter estrambótico de las superposiciones cuánticas en 1935, con su ejemplo del gato que, encerrado en una caja hermética cuyo interior no es posible observar, está vivo y muerto a la vez. Cuando en un experimento se produce una interferencia cuántica, hay en él algo del gato de Schrödinger: en vez de estar vivo y muerto al mismo tiempo, el gato podría rodear un árbol por un lado y por el otro simultáneamente.

El gato de Schrödinger deja de encontrarse en superposición en cuanto abrimos la caja y examinamos su contenido: lo veremos vivo o muerto, pero no ambas cosas (aunque según algunas interpretaciones de la mecánica cuántica *nosotros* nos convertimos en una superposición de haber visto un gato vivo y de haber visto un gato muerto). Si cerca del árbol hubiera un foco de luz encendido, veríamos al gato cuántico pasar por uno de los dos lados, no por ambos. De manera análoga, cabe añadir un instrumento de medida para observar el paso de cada partícula por las rendijas. Podríamos imaginar una luz brillante enfocada sobre cada rendija, de suerte que la partícula, al pasar, hiciera ver

## Material necesario para el experimento

- **Una habitación muy oscura.**
- **Película polarizante**. Los mejores resultados se obtienen con película de color gris liso y alta calidad (“calidad de laboratorio”). Evítense las películas teñidas de algún color. Es necesario cortar la hoja en seis piezas cuadradas, de unos 5 cm de lado cada una. Véase la explicación del recuadro “Qué les hace un polarizador a los fotones”.
- **Un láser**, por ejemplo un puntero. Si el que el lector posee emite luz polarizada, alinee su polarización a 45 grados de la vertical. Si no es polarizado, sitúe un polarizador a 45 grados inmediatamente delante del láser en cada uno de los pasos. Utilice una goma para mantenerlo encendido.
- **Un trocito de alambre, fino y recto**, cuanto más delgado mejor. Una grapa enderezada o uno de los hilos de un cable eléctrico pueden servir.
- **Un pedazo de papel de estaño o de aluminio** y una aguja fina, para perforar un agujerito en él. La luz que sale del pinchazo se expandirá hacia adelante, formando un haz cónico estrecho. Lo diminuto de la perforación hace que las figuras resulten más tenues. Si la habitación está suficientemente oscura, los resultados pueden ser más nítidos.
- **Soportes** para mantener en su lugar al láser y los polarizadores. Valen los soportes hechos con cajas de galletas.
- **Una pantalla**, donde aparecerán los resultados finales. La pared desnuda puede servir si presenta la lisura conveniente. También resultan prácticas una hoja de papel o una cartulina blanca.

# Borrador cuántico en casa

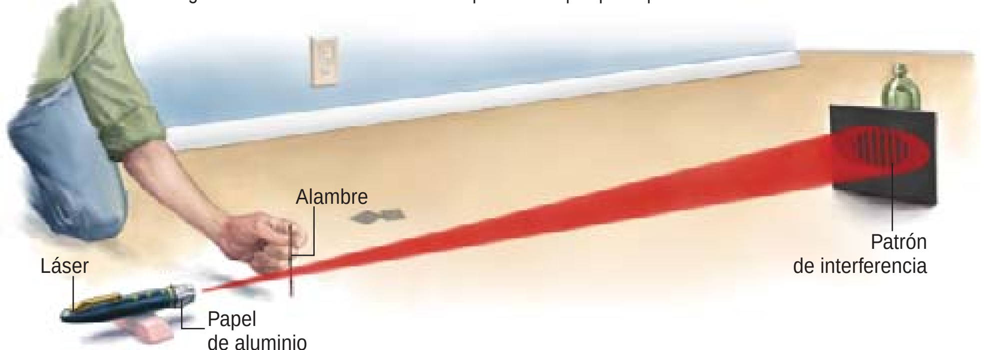
**Se explica aquí de forma esquemática cómo observar el borrado cuántico.**




## 1 OBSERVACION DE LA INTERFERENCIA

- Envuelva el papel de aluminio alrededor del extremo luminoso del láser y perfórelo con un alfiler para dejar pasar un haz estrecho de luz.
- Prepare el láser para que ilumine la pantalla desde una distancia de dos metros por lo menos. Debería proyectar sobre la pantalla un punto circular.
- Sitúe el alambre en posición vertical, centrado en la luz.

**LO QUE OCURRE:** Como se muestra, debería verse un patrón de interferencia consistente en una hilera de franjas (*bandas brillantes y oscuras*). La figura de interferencia se debe a que la luz que pasa por la izquierda del alambre se combina, o "interfiere," con la luz que pasa por su derecha. Si se coloca un pedazo de papel un poquito por detrás del alambre, se verá un lóbulo de luz a cada lado de la sombra del alambre. Los lóbulos se han expandido y superpuesto casi por completo al llegar a la pantalla. Es imposible saber de cada fotón individual que llega a la pantalla en la región de superposición de los lóbulos si pasó por el lado derecho o por el lado izquierdo del alambre. La combinación de los dos modos provoca la interferencia. Aunque estamos viendo billones de fotones, cada uno de ellos interfiere sólo consigo mismo.

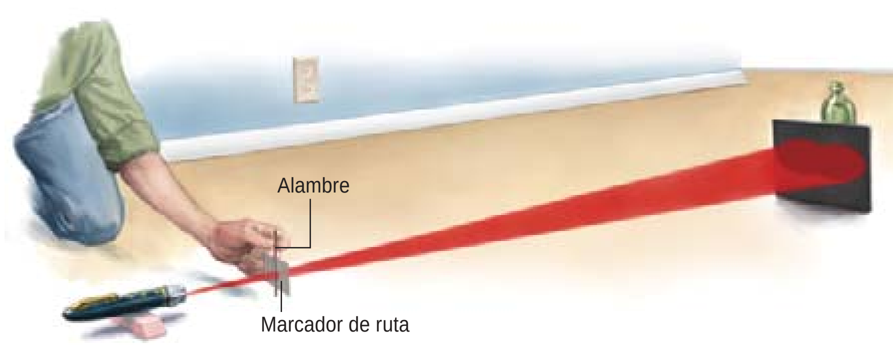





**LA INTERFERENCIA observada.** En el diagrama se han exagerado el tamaño y otros rasgos de los patrones de interferencia.

## 2 MARCADO DEL CAMINO

- Tome dos polarizadores y vaya girando uno de ellos hasta que sus ejes sean perpendiculares; sabrá que lo ha hecho correctamente si, al superponerlos, no pasa luz por la parte donde están superpuestos.
- Péguelos a tope con cinta adhesiva, borde contra borde, sin fisuras y sin que se traslapen. La cinta deberá ir por los bordes inferior y superior, para que no bloquee la luz. Esta pieza servirá para "rotular" el camino.
- Sitúe ese marcador dentro del haz, de manera que la unión se encuentre justo detrás del alambre. Lo más sencillo sería fijar el alambre al marcador, pues ya no se moverán durante el resto del experimento. Diremos, por convenio, que el polarizador izquierdo produce luz de polarización vertical (V) y el polarizador derecho, luz de polarización horizontal (H). Aunque sea al contrario, para el experimento resulta indiferente.




**LO QUE OCURRE:** Aunque la luz está de nuevo pasando por ambos lados del alambre, las franjas deberían desaparecer. Un fotón que llegue a la pantalla tras pasar por el lado izquierdo del alambre, arribará polarizado V; si pasa por el lado derecho, lo hará polarizado H. El marcador ha hecho disponible la información relativa al lado por donde pasa cada uno de los fotones, lo que impide la interferencia.



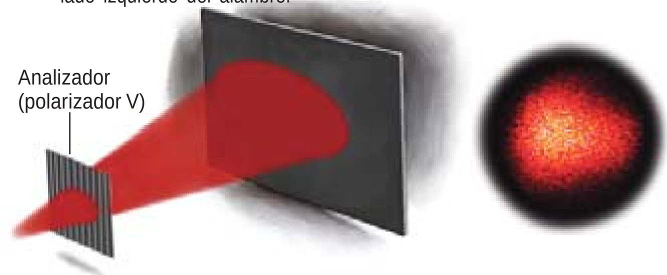
RACHEL HILLMER (*fotografías de patrones de luz*); BRIAN MARANAN PINEDA (*sistemas de láser*); MATT COLLINS (*dibujos y gato*)



## SELECCION DE LOS FOTONES QUE PASAN POR EL LADO IZQUIERDO

- Situemos entre el marcador y la pantalla un tercer polarizador (el "analizador") en la orientación V.

**LO QUE OCURRE:** El analizador bloqueará todos los fotones correspondientes al lado derecho (que tienen la polarización H impuesta por el marcador) y dejará pasar a su través todos los llegados desde el lado izquierdo. La figura será casi igual a la del paso anterior, sólo que más tenue y no tan extendida hacia la derecha, porque consta solamente del lóbulo izquierdo de la luz. Con el analizador estamos accediendo a la información que el marcador hizo disponible: sabemos que todos los fotones que llegan a la pantalla han pasado por el lado izquierdo del alambre.

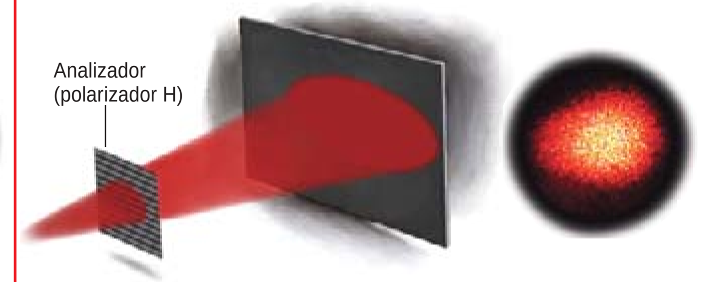





## SELECCION DE LOS FOTONES QUE PASAN POR EL LADO DERECHO

- Situemos el analizador en la orientación H.

**LO QUE OCURRE:** El analizador H bloquea el lóbulo izquierdo de la luz; solamente dejará pasar al lóbulo derecho. Si se midiera la intensidad de la luz (es decir, el número de fotones) en la pantalla, se encontraría que la cantidad de luz del paso 2 era precisamente la suma de la correspondiente a los pasos 3 y 4. Fijémonos que en el paso 2 faltaban las franjas, a pesar de que no estábamos informándonos de la polarización de los fotones; era suficiente que pudiéramos hacerlo, como en los pasos 3 y 4.






## BORRADO DE LA INFORMACION SOBRE EL CAMINO

- Se gira el polarizador 45 grados en sentido horario desde V. Esta orientación se llamará "D" (diagonal).

**LO QUE OCURRE:** ¡Vuelven las franjas! ¿Por qué? El polarizador está borrando la información relativa al lado por donde pasa cada fotón. En la disposición actual, cada fotón V que pasa por el lado izquierdo tiene una probabilidad del 50 por ciento de llegar a la pantalla; lo mismo vale para cada fotón H que pasó por el lado derecho. En ambos casos, los fotones que han atravesado el analizador quedan polarizados D, por lo que no hay forma de saber desde qué lado ha llegado cada fotón. Una vez más, cada fotón parece haber pasado por ambos lados a la vez e interferirse a sí mismo.






## EL ANTIBORRADOR

- Se gira el polarizador 45 grados en sentido antihorario a partir de V ("antidiagonal" o "A").

**LO QUE OCURRE:** Vuelven las franjas. Todo lo dicho en el paso 5 vale también para un borrador con polarización A. Pero si se observa atentamente se verá que las franjas están ligeramente desplazadas en uno y otro casos. Las franjas A son brillantes donde las franjas D son oscuras, y recíprocamente. Si se pudieran sumar las intensidades —los números de fotones— correspondientes a los borradores D y A, la suma volvería a ser la figura del paso 2, sin interferencia visible.






## AMBOS BORRADORES A LA VEZ

- Se corta horizontalmente por la mitad un polarizador con orientación D y otro con orientación A.
- Se une la mitad superior del polarizador D con la mitad inferior del A.
- Se coloca en su sitio el analizador híbrido.

**LO QUE OCURRE:** Aparecen franjas D en la mitad superior de la luz y franjas A en la mitad inferior. La figura resultante hace pensar en una dentadura desencajada, y deja ver claramente cómo se corresponden las franjas oscuras y claras de cada borrador.




## CONCLUSION

Pensemos en lo que hacen los fotones en cada uno de los pasos.

- En ciertos pasos (*3 y 4*) cada fotón cursa por uno de los dos lados del alambre (no hay interferencia), pero en otros (*1, 5, 6 y 7*) parece que hubieran pasado por ambos lados a la vez (con producción de interferencia).
- Nuestra interpretación de lo que hicieron los fotones al pasar junto al alambre dependerá de lo que encontraron *posteriormente* en el montaje, según fuera un analizador, o un borrador, o nada salvo la pantalla.
- Los pasos 6 y 7 revelaron que la información sobre el camino tomado puede ser borrada de más de una forma y producir, ora el patrón de interferencia original, ora su inverso.

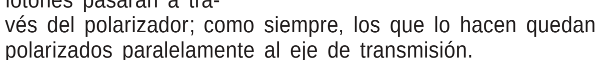


## Qué les hace un polarizador a los fotones

La película polarizante posee un eje (en nuestros diagramas su dirección está representada por líneas paralelas sobre la película). Esta película sólo permite el paso de la luz que está oscilando en un plano paralelo al eje. La luz se puede asimilar a ondas de una cuerda sostenida por dos personas; la cuerda, al oscilar, puede moverse arriba y abajo, de un lado a otro, o en cualquier ángulo intermedio. El ángulo del plano de oscilación constituye la "polarización" de la onda.

La película polarizante es como una barrera de barras paralelas a cuyo través hubiese de pasar la cuerda ondulante: permite el paso sin dificultad de las ondas polarizadas paralelamente a las barras, bloquea por completo las perpendiculares y, aunque permite que pasen las oblicuas, amortigua su amplitud. Lo que reviste mayor interés: la onda (si la hay) que sale del filtro polarizante está polarizada en un plano paralelo al eje de transmisión del polarizador.

La descripción cuántica de lo que le ocurre a la luz que pasa a través de una película polarizante suena sólo un poco distinta: la luz está compuesta por partículas individuales, los fotones. Estos, lo mismo que la onda, tienen cada cual una dirección de oscilación. Un fotón que impacte en el filtro polarizante lo atravesará si su dirección de polarización cursa paralela al eje de transmisión del filtro; pero quedará bloqueado si es perpendicular. Con un ángulo de 45 grados, el fotón tiene una probabilidad del 50 por ciento de pasar (la probabilidad exacta depende del ángulo). Cuando un fotón atraviesa el polarizador, su polarización, al salir, será paralela al eje de transmisión del filtro.



La luz puede también hallarse sin polarizar, lo que significa que los fotones que la integran presentan polarizaciones aleatorias. Tenemos aquí otro caso en el que la mitad de los fotones pasarán a través del polarizador; como siempre, los que lo hacen quedan polarizados paralelamente al eje de transmisión.

Se puede apreciar cómo funcionan los polarizadores adosando dos de ellos. Cuando sus ejes se alinean al hacer girar uno con respecto al otro se puede ver claramente a su través; cuando los ejes son perpendiculares, en cambio, no se ve nada, y con los ángulos intermedios se percibe en medida variable. Los fotones que pasan por el primer polarizador quedan orientados por él; la probabilidad de que puedan atravesar el segundo depende del ángulo que haya entre su propia polarización y el eje de transmisión del segundo filtro.

Se ejerce un efecto interesante cuando dos polarizadores son perpendiculares y se inserta un tercero oblicuamente entre uno y otro (el mejor ángulo es 45 grados): la inclusión del tercer polarizador permite que algo de luz pase a través de los tres, aunque podría pensarse que el tercer filtro sería un obstáculo más a superar. El borrador cuántico doméstico se basa también en un polarizador a 45 grados que cambia lo que hace la luz.

BRIAN MARANAN PINEDA

un destello de luz dispersado desde el lugar por donde pasó. Los destellos vuelven distinguibles a las rendijas: se destruye entonces la superposición, y las partículas no generan, al llegar a la segunda pantalla, un patrón de franjas de interferencia, sino un borrón sin estructura. Se han realizado experimentos similares a los de este supuesto; y tal como pronosticaba la mecánica cuántica, no aparecen los patrones de interferencia.

No tenemos auténtica necesidad de "mirar". No hace falta detectar los destellos de luz y comprobar por qué senda ha ido cada partícula: basta con que la información esté disponible en los destellos y *pudiera* haber sido observada de ese modo.

Llegamos, por fin, al borrador cuántico. Por tal se entiende cualquier dispositivo que elimine la información que indica la senda que ha seguido cada una de las partículas y, por ende, restaura la indiferenciación de las alternativas y la interferencia. ¿Cómo podrá un borrador hacer tal cosa?

Imaginemos que el "destello de luz" dispersado desde cada partícula consista en un solo fotón. Para que el fotón revele el camino que ha tomado la partícula ha de resultar posible (aunque fuera sólo en principio) determinar de qué rendija proviene el fotón: para distinguir las rendijas, hemos de poder medir con precisión suficiente la posición desde la que el fotón se dispersó. Sin embargo, el principio de incertidumbre de Heisenberg nos dice que, si medimos con mucha precisión el momento de cada fotón, sus posiciones quedarán menos definidas. Por consiguiente, si hacemos que los fotones atraviesen una lente que proporcione la información sobre sus momentos, quedará borrada la relativa a sus posiciones. Cuando eso sucede, las dos sendas que pueden seguir las partículas vuelven a ser indistinguibles y se restablece la interferencia.

Hemos omitido un último y delicado detalle, sobre el que volveremos. Pero primero detengámonos un instante y consideremos qué está ocurriendo en el proceso de borrado que acabamos de describir, pues ahí reside lo extraño. Cuando detectamos la posición en la que resultó dispersado uno de los fotones, nos estamos informando de la rendija por la que pasó su correspondiente partícula, lo que significa que la partícula *pasó* a través de *una* de las dos rendijas y no de la otra.

En cambio, si detectamos el momento del fotón, no podremos saber cuál de las dos fue la rendija atravesada. Más aún, cuando efectuamos muchas mediciones de momentos y observamos un patrón de interferencia, inferimos que en esos casos las partículas tuvieron realmente que pasar a través de ambas rendijas (pues de lo contrario la interferencia sería imposible).

Dicho de otro modo: la respuesta de la pregunta "¿ha pasado la partícula por una de las rendijas, o por ambas?" depende de lo que hagamos con el correspondiente fotón mucho *después* de que la partícula haya pasado por ellas. Como si lo que se haga con los fotones influyese sobre lo acontecido en sucesos pasados. Podemos


### Los autores

**Rachel Hillmer** y **Paul Kwiat** pertenecen a la Universidad de Illinois. Hillmer trabaja en el laboratorio de Kwiat, quien ocupa la cátedra Bardeen de física.

averiguar por cuál de las rendijas pasó la partícula, o bien, con nuestro borrador cuántico, eliminar del universo esa información.

Lo más extraño de todo es que podemos decidir cuál de las mediciones efectuar *después* de que la partícula haya pasado por las rendijas: podemos tener instalado el aparato para efectuar ambas mediciones, con un conmutador que pulsaremos para escoger entre ellas antes de la llegada del fotón. Tal variante de "elección demorada" se debe a John A. Wheeler, de la Universidad de Texas en Austin, quien la expuso en 1978. Generaliza un supuesto analizado, desde posiciones contrarias, por Niels Bohr y Albert Einstein en 1935 en sus debates sobre la mecánica cuántica y la naturaleza de la realidad.

En este punto, los lectores se estarán planteando un problema fundamental que parece socavar lo que acabamos de exponer, a saber: ¿por qué no podemos retrasar la elección de la medición del fotón hasta después de que hayamos observado si las partículas forman o no un patrón de interferencia?

Podríamos, en efecto, hacerlo. ¿Cómo? Situando la pantalla final no demasiado lejos de las rendijas y colocando el detector de fotones mucho más allá. Así pues, ¿qué ocurriría si se observara que las partículas dibujan franjas y optásemos entonces por efectuar mediciones posicionales de los fotones que impidieran la generación de dichas franjas? ¿No habríamos creado una paradoja? ¡No sería de esperar que el patrón de interferencia recién registrado se esfumase! Un razonamiento parecido sugiere que podríamos utilizar el efecto de elección demorada para transmitir instantáneamente mensajes a distancias arbitrarias (eludiendo la limitación impuesta por la velocidad de la luz).

La situación se salva gracias al detalle fino al que nos hemos referido antes: para observar la interferencia de las partículas después de aplicar el borrador cuántico, tenemos primero que dividirlas en dos grupos y observar los grupos por separado. Uno de los grupos ofrecerá el patrón de franjas original; el otro presentará el patrón inverso, con partículas que acaban en lo que antes eran franjas oscuras y evitan, en cambio, los lugares donde se encontraban las franjas encendidas. La combinación de los dos grupos rellena todos los huecos y de este modo oculta la interferencia.

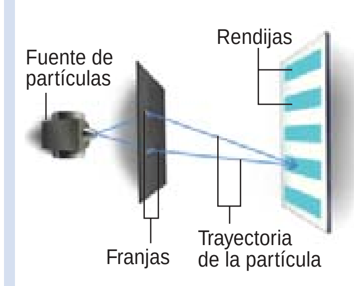
La paradoja queda obviada porque necesitamos datos tomados de la medición de fotones para saber a qué grupo pertenece cada partícula. Por consiguiente, no podemos observar las franjas hasta que hayamos efectuado las medidas de los fotones, pues sólo entonces sabremos cómo separar las partículas en grupos. En el experimento doméstico, la división de partículas en grupos se realiza automáticamente: uno de los grupos queda bloqueado por el filtro polarizante y, por consiguiente, podemos ver con nuestros propios ojos el patrón de interferencia creado por el grupo que atraviesa el filtro. En el último paso se pueden ver los patrones de interferencia de los dos grupos justo uno al lado del otro.

Desde un punto de vista práctico, la incapacidad de enviar mensajes a velocidad mayor que la de la luz y crear así una paradoja resulta un tanto decepcionante, pero a los físicos y a los lógicos les parece una propiedad muy grata.

## Así funciona un borrador cuántico

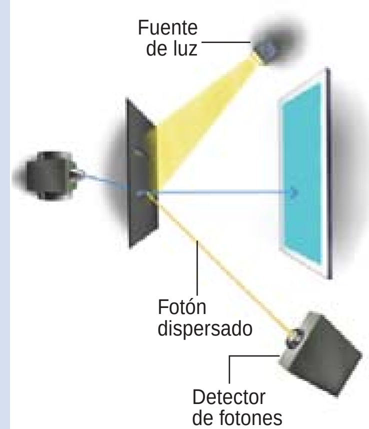
El comportamiento de las partículas cuánticas puede depender de la información sobre ellas a las que se pueda tener acceso. Un borrador cuántico elimina algo de esa información y restaura con ello la interferencia. La acción del borrador se comprenderá mejor considerando un experimento de "doble rendija".

### CREACION DE INTERFERENCIA CUANTICA



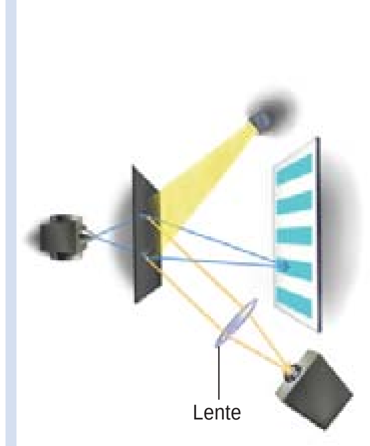

Las partículas enviadas a través de dos rendijas generan sobre una pantalla detectora una serie de bandas (las franjas de interferencia) debido a que llegan en gran número a ciertas regiones (*en azul*), mientras que a otras (*en blanco*) arriban muy pocas. Este patrón de interferencia solamente se presenta si cada partícula pudo viajar a través de *ambas* rendijas para alcanzar la pantalla (*flechas*).

### IMPEDIR LA INTERFERENCIA




Las franjas no aparecen si las partículas interactúan con algo que pudiera utilizarse para conocer de cierto la ubicación de cada partícula en las rendijas. Por ejemplo, un fotón de luz (*línea amarilla*) podría dispersarse en la partícula y revelar que ésta pasó por la rendija de la derecha. No es necesario que se detecte el fotón; importa que la información acerca de la rendija por la que pasó podría determinarse si se detectara el fotón.

### EL BORRADOR RESTAURA LA INTERFERENCIA




Un borrado cuántico elimina la información sobre la rendija. Si la partícula provoca la dispersión de un fotón, una lente podría hacer imposible conocer con certeza de qué rendija proviene el fotón. En ese caso, la partícula correspondiente parece haber atravesado ambas rendijas, lo mismo que antes, y vuelven a observarse franjas de interferencia. La propiedad más extraña de este borrado cuántico estriba en el comportamiento de la partícula en las rendijas, que parece depender de lo que se encuentra el fotón *después* de que la partícula haya atravesado la(s) rendija(s).

MATT COLLINS

## Dieta del gato montés en Eurasia

*Patrones biogeográficos*

El conocimiento de la ecología trófica es fundamental para comprender las estrategias vitales de una especie. La interacción entre el comportamiento alimentario y la distribución y abundancia de los distintos recursos tróficos —de los que todas las especies dependen— influyen en el tamaño corporal, el uso del espacio y el tiempo o el sistema de emparejamiento. Incluso es útil para detectar posibles problemas de conservación de diferentes poblaciones en determinados lugares, si no de la propia especie en su conjunto.

La mayoría de los estudios con mamíferos carnívoros se realizan a escala local o regional. Para descubrir la dieta de una población se analiza el contenido de los estómagos de ejemplares muertos o los excrementos de la especie recogidos en el campo.

Sin embargo, para hallar patrones generales en las distintas poblaciones y establecer una concepción global del comportamiento trófico de una especie, deben estudiarse escalas mayores. Una forma de llevarlo a cabo consiste en reanalizar conjuntamente los datos de un número significativo de trabajos más locales relativos a su dieta. Esta manera de proceder recibe el nombre de meta-análisis.

Con ese procedimiento se ha podido determinar —para mamíferos carnívoros de amplia distribución geográfica, presentes por tanto en hábitats muy diferentes, como el puma (*Puma concolor*) en América o el tejón (*Meles meles*) y la gineta (*Genetta genetta*) en el Paleártico (Eurasia)— que la diversidad de sus dietas aumenta en latitudes bajas y en zonas de clima mediterráneo. Estos resultados muestran además el carácter generalista de las especies mencionadas, que aprovechan la mayor cantidad de presas disponibles; siguen el conocido patrón biogeográfico del incremento de riqueza o número de especies de los polos hacia al ecuador.

En el caso del gato montés europeo (*Felis silvestris silvestris*) existe una treintena de estudios que describen su alimentación en casi todos los lugares de su área de distribución euroasiática, desde el Cáucaso hasta Iberia y Escocia. Las dietas que incluyen no tienen una misma composición.

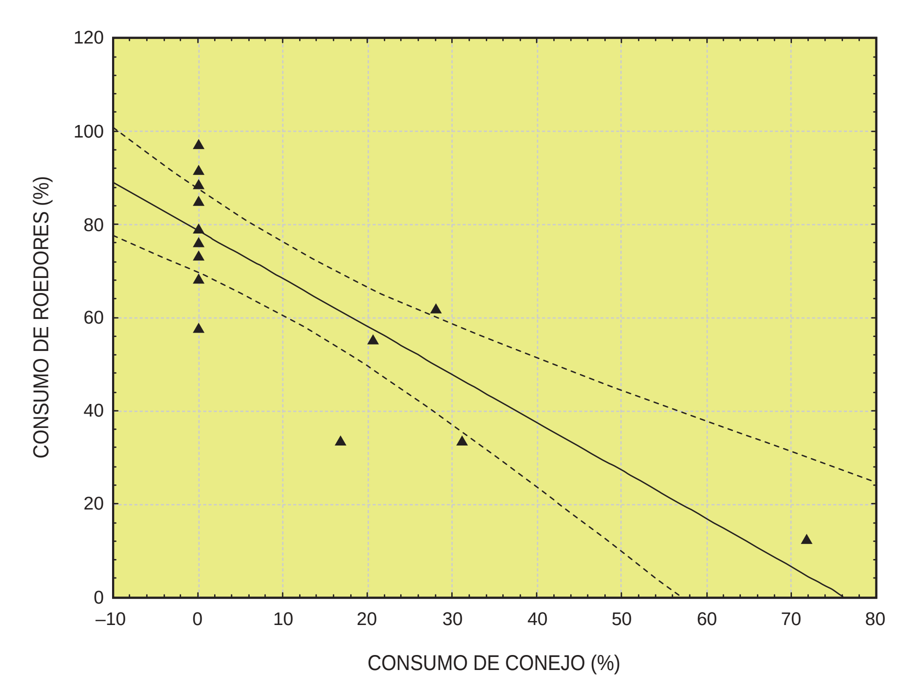
En general, el felino se presenta como un carnívoro capaz de alimentarse con una amplia gama de presas, desde insectos hasta pequeños ungulados, aunque los roedores aparecen en la mayoría de los trabajos como las presas principales, excepto en las zonas donde hay conejo (*Oryctolagus cuniculus*), es el caso de Escocia y la península Ibérica. Se ha podido comprobar que en España central, allá donde esté presente, el conejo desplaza a los roedores en la dieta del gato montés. Parece, pues, que hay una especialización facultativa del félido sobre el lagomorfo. En todo caso, ningún trabajo sobre la dieta de la especie se había realizado hasta ahora con una aproximación biogeográfica a escala continental.

Los autores de esta nota analizamos 15 trabajos sobre la dieta del gato montés europeo representativos de toda la región euroasiática, que recogían información precisa y comparable entre sí. Buscábamos patrones biogeográficos en sus hábitos



1. El gato montés es un carnívoro mediano de amplia distribución geográfica que se especializa facultativamente en el consumo de conejo.

A. F. MALO




2. Relación negativa en la dieta del gato montés entre el consumo de roedores (se han omitido las especies mayores que la rata común, de presencia escasa en la dieta) y el consumo de conejo, expresados como frecuencia relativa de aparición en la dieta respecto al total de presas ingeridas.

alimentarios y, con ello, esclarecer algunas cuestiones sobre la ecología trófica de la especie. El primer resultado que obtuvimos fue que el gato montés consume más liebres en las latitudes altas, mientras que en las bajas caza más reptiles e invertebrados. Después, calculamos, para cada lugar, la diversidad de la dieta, por medio del índice de Shannon-Wiener; comprobamos que, al igual que otros carnívoros, la diversidad trófica tendía a ser menor en latitudes altas y era claramente mayor en las áreas mediterráneas. El valor de diversidad bajaba cuando los roedores dominaban la dieta y aumentaba al incorporar conejos, insectívoros, invertebrados y reptiles.

Aunque se venía admitiendo que una relación negativa entre la diversidad trófica y un grupo presa (en este caso los roedores) denunciaba una especialización del depredador en el grupo en cuestión, encontramos que el consumo de roedores caía con el aumento de conejos en la dieta; en general, se reduce a la mitad en las zonas donde el conejo está presente.

No podía, pues, considerarse al gato montés un especialista en roedores, ya que el conejo los desplazaba en la dieta. Demostramos que dicha relación negativa no servía de indicador de especialización trófica por sí misma; hay que tener en cuenta otras presas potenciales. Comprobamos también que, dentro de los roedores, el felino consumía más ejemplares de la subfamilia microtinos (topillos) en latitudes altas y de la subfamilia murinos (ratones) en las bajas, lo que coincidía con el patrón de distribución y densidad de ambos grupos taxonómicos.

De lo anterior cabe extraer una conclusión principal: el gato montés se comporta como un especialista facultativo, ya que se especializa en consumir conejos donde los hay y prefiere los roedores sobre otras presas en las áreas donde el lagomorfo no se encuentra. No obstante, presenta también ciertas variaciones geográficas en su dieta a escala continental, asociadas a la latitud y al clima mediterráneo, y tiende a aprovechar la diferente disponibilidad de presas en cada lugar.

Jorge Lozano
Area de Biodiversidad y Conservación, ESCET, Universidad Rey Juan Carlos
Marcos Moleón
Dpto. de Biología Animal y Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada
Emilio Virgós
Area de Biodiversidad y Conservación, ESCET, Universidad Rey Juan Carlos

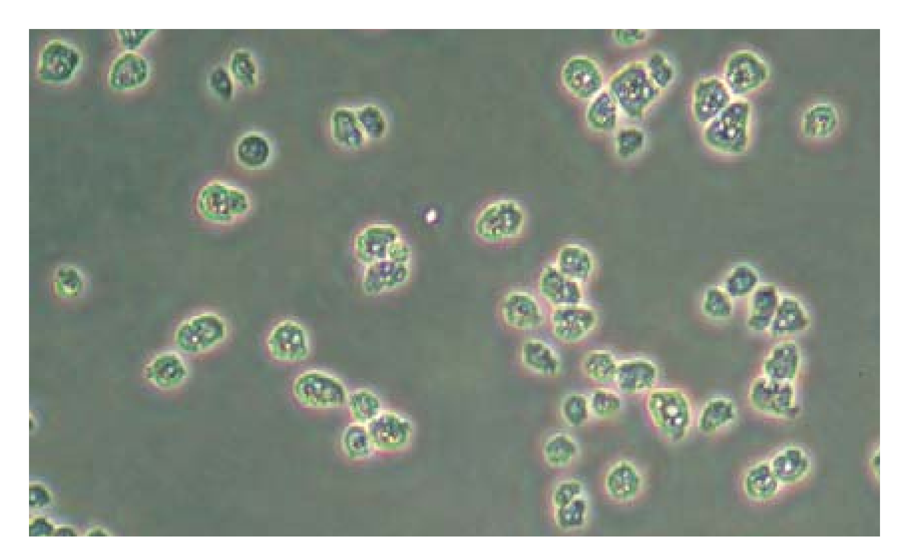
## La ameba social

*Organismo modelo para la biomedicina*

Uno de los problemas principales a los que se enfrenta la ciencia a la hora de abordar el estudio de los procesos naturales reside en la complejidad de los mismos. No sólo en biología, sino también en física, química y matemática, los expertos se han visto obligados a recurrir a sistemas y modelos sencillos que puedan investigarse con las herramientas experimentales de cada época y permitan extrapolar sus propiedades a sistemas de mayor complejidad.

La biomedicina, disciplina que trata de desentrañar las bases genéticas, moleculares y fisiológicas de las enfermedades, hace uso de organismos modelo. A las razones aducidas hemos de añadir motivos éticos. Las limitaciones que supone la realización de cualquier estudio en humanos han impulsado la utilización de organismos alternativos como modelos de estudio. Algunos de ellos (el ratón, por ejemplo) guardan una gran semejanza con el ser humano; resultan de gran utilidad para el estudio fisiológico de las enfermedades. Mas, para comprender los mecanismos moleculares que subyacen en un proceso patológico, se requieren organismos más sencillos, cuyas bases moleculares y celulares sean similares a las del ser humano y, al propio tiempo, faciliten la experimentación genética. La ameba social, *Dictyostelium discoideum*, cumple los requisitos. Se trata de un modelo idóneo para la investigación biomédica.

*Dictyostelium* es un organismo eucariota unicelular. Aunque comparte características con tres grandes reinos (animales, plantas y hongos), constituye el grupo independiente de los Mycetozoa. Presenta un ciclo



1. Fase unicelular de *Dictyostelium*. A diferencia de levaduras y otros organismos eucariotas unicelulares, las células de *Dictyostelium* carecen de una pared externa. Ello les confiere una forma irregular y facilita el estudio de la motilidad celular y la citoquinesis.

biológico de dos fases. La primera corresponde a un organismo unicelular formado por poblaciones de amebas que se alimentan sobre todo de bacterias, a las que ingieren por fagocitosis (proceso similar al que usan las células del sistema inmunitario humano para defenderse de las infecciones). En esas condiciones, las células crecen y se dividen por fisión binaria.

2. Fase pluricelular de *Dictyostelium*. Tras agotar las bacterias que les sirven de alimento, las células de *Dictyostelium* se agregan para formar un organismo multicelular perceptible a simple vista. En la fotografía se muestra una colonia con agregados en distintas fases de desarrollo. En la parte central se observan varios cuerpos fructíferos, constituidos por un tallo y una cápsula de esporas.

Cuando escasea el alimento, se inicia la segunda fase del ciclo: un asombroso proceso de agregación, en el que las células adquieren capacidad de moverse hacia gradientes químicos que ellas mismas van creando. Ese proceso de quimiotaxis guarda estrecha semejanza con el empleado por nuestro sistema inmunitario para dirigir los leucocitos hacia los lugares de infección o inflamación.

La agregación de unas 100.000 células produce un organismo multicelular, que atraviesa varias etapas de desarrollo hasta dar lugar a un cuerpo fructífero. Consta éste de un tallo de células muertas y una cápsula de esporas, que permiten a *Dictyostelium* dispersarse y sobrevivir en las épocas de ayuno. La fase unicelular facilita el estudio de aspectos tan importantes como la motilidad celular, la división celular y la quimiotaxis. La fase pluricelular permite abordar aspectos de la diferenciación y el desarrollo celulares.

Se recurre a *Dictyostelium* para modelizar diversas enfermedades y ahondar en las bases moleculares de las mismas; por ejemplo el síndrome de Wiskott-Aldrich y el de Chediak-Higashi, entre otras inmunodeficiencias. Se aplica también al estudio del trastorno afectivo bipolar y del modo en que operan los fármacos indicados para su tratamiento. La formación de agregados proteicos en enfermedades neurodegenerativas, como los cuerpos de Hirano, pueden remedarse y estudiarse en *Dictyostelium*. Además, las bases celulares de la infecciosidad de patógenos intracelulares y oportunistas, como la bacteria *Legionella*, se están abordando en este modelo para la identificación de proteínas patogénicas.

Tras la secuenciación del genoma de *Dictyostelium*, podemos avanzar en el desarrollo de la genómica comparada y funcional. La secuenciación del genoma humano puso de relieve el gran número de genes cuya función se desconoce y cuya secuencia no muestra homologías con dominios funcionales caracterizados. En organismos de la sencillez de las bacterias, la proporción de genes de función desconocida puede llegar al 35 por ciento. Algunos de ellos se han mantenido en el curso de la evolución, es decir, los descubrimos en organismos muy distantes desde el punto de vista evolutivo. Tal conservación atestigua que desempeñan funciones importantes y que su inactivación pudiera estar relacionada con procesos patológicos.

En nuestro laboratorio hemos comparado la secuencia de las proteínas codificadas en el genoma humano con las de *Dictyostelium*. Hemos seleccionado un conjunto de genes conservados en ambos organismos cuya función se desconoce. Merced a la facilidad de la manipulación génica en *Dictyostelium*, hemos comprobado la decisiva intervención de algunos de esos genes en funciones biológicas esenciales. La inactivación de los genes en cuestión mediante técnicas de ingeniería genética facilita el avance en el estudio de la función y la extrapolación de los conocimientos adquiridos a organismos superiores. Nuestros resultados revelan, por ejemplo, algunos aspectos de la función de una nueva proteína mitocondrial, MidA, cuya alteración afecta negativamente a la capacidad energética de la mitocondria. Sabido es que este orgánulo del citoplasma genera ATP, combustible necesario para mantener las funciones vitales.

Juan Jesús Vicente
Ricardo Escalante
Instituto de Investigaciones Biomédicas
Alberto Sols, CSIC/UAM, Madrid

Hervé This

# Reblandecimiento de los alimentos

La carne lechosa del calamar provoca la desazón del cocinero. ¿Conseguirá impedir que la cocción la endurezca demasiado? Para evitarlo, los cocineros se sirven a veces de procedimientos cuestionables. Unos proponen ablandar el calamar cociéndolo en agua con un tapón de corcho, otros lo comprimen en una prensa entre dos planchas de madera, lo sumergen en bebidas gaseosas o incluso lo congelan durante dos horas y después lo golpean contra el banco de cocina. Esa última idea parece interesante. En la Universidad de Yamaguchi, M. Ando y M. Miyoshi se han propuesto desentrañar los efectos de la congelación y el sobreenfriamiento. El interés de los japoneses por la blandura del calamar no debe sorprendernos, pues este cefalópodo es el invertebrado más consumido en su país.

El sobreenfriamiento y la congelación de los alimentos modifican su estructura. En 1988, en el Instituto Nacional de Investigaciones Agronómicas en Francia de Clermont-Ferrand, J.-D. Daudin estudió la formación de cristales de hielo en la carne de los animales. La carne es tejido muscular, compuesto de fibras musculares unidas en haces mediante colágeno. Las fibras musculares constan de células cuyo diámetro abarca de 10 a 100 micrometros y cuya longitud puede alcanzar varios centímetros. El colágeno constituye el responsable principal de la dureza de la carne.

Cuando se enfría la carne por debajo de la temperatura de solidificación del agua aparecen cristales, primero en el espacio intercelular y después en el interior celular. ¿Por qué en ese orden? Las moléculas que se hallan disueltas rebajan la temperatura de congelación de la mezcla. (El mismo descenso crioscópico opera cuando añadimos anticongelante al radiador del coche, pues impide la formación de cristales de hielo.) Dado que la concentración de soluto es menor en los fluidos intercelulares que en el interior de las células, el descenso crioscópico es menor fuera de la célula que dentro; por ello los cristales aparecen primero entre las células. A continuación, los cristales formados evolucionan: los de mayor tamaño crecen de forma progresiva a costa de los menores. Esa destrucción de las uniones entre fibras fomenta el reblandecimiento de la carne.

¿Le ocurre lo mismo a la carne del calamar? En 1994, M. Kugino y K. Kugino demostraron que la congelación del calamar mejoraba su terneza. Al cocerse, el calamar congelado se ablandaba más que el no congelado. Observaron también que el efecto de la congelación sobre la terneza era superior en la carne no cocida. Poco después, D. Stanley y H. Hultin demostraron que ello se cumplía sólo en el caso de los calamares japoneses *Todarodes pacificus*; la carne cocida del calamar del Atlántico, en cambio, quedaba más dura, si antes se había congelado. Ese fenómeno se ha atribuido a la generación de formaldehído en la carne congelada del calamar atlántico; dicho compuesto reforzaría las uniones entre proteínas, lo que endurecería la carne.

La conclusión de todo ello es que las condiciones de la congelación resultan determinantes. M. Ando y M. Miyoshi reemprendieron el estudio de la dureza de la carne de los calamares comunes japoneses, congelándolos un día después de la pesca. Han demostrado que el reblandecimiento tiene lugar sobre todo durante los tres primeros días de congelación. Así pues, el calamar no difiere mucho, en ese aspecto, de los peces, cuya congelación saca a la luz el mismo tipo de comportamiento mecánico.

Los investigadores japoneses no se han limitado a medir las características mecánicas. Al examinar el líquido que se desprende de la carne descongelada, demostraron que la cantidad de aquél aumentaba de forma notable a lo largo de un mes. Este fenómeno se debe al progresivo deterioro de las fibras musculares por la acción de los cristales de hielo.

Por último, el análisis microscópico de la estructura ha revelado que, cuando se prolonga la congelación, las fibras musculares se degradan: se forman entre las células cristales de hielo, que las van separando, con lo que se desestructura la carne; el crecimiento de los cristales trae consigo un deterioro celular que deja rezumar los líquidos.

Así pues, la receta consistente en congelar el calamar y golpearlo después tiene sus virtudes. También en otros ámbitos la práctica de golpear para reblandecerlo tuvo sus discípulos y sus prosélitos.



iStockphoto.com/Alexander Heitkamp

Xavier Aurell

# Las rocas del cabo de Creus

1. Acantilado y formas de modelado singulares en las pegmatitas, encajadas en esquistos, cerca de cala Prona.

El cabo de Creus constituye el extremo oriental de la cordillera Pirenaica. Sus rocas se formaron en el período Cambro-ordovícico de la era Primaria, hace unos 500 millones de años. En origen sedimentarias, esas rocas se plegaron durante la orogénesis Herciniana (Carbonífero) en sucesivos episodios de deformación y metamorfismo; sufrieron luego la intrusión de rocas ígneas. La geodiversidad del cabo de Creus es, por tanto, notable: afloran rocas metamórficas (esquistos, cuarcitas, anfibolitas, milonitas, mármoles y gneises), ígneas (granitoides, dioritoides y pegmatitas) y también sedimentarias (gravas, arenas, limos y arcillas). Estas últimas se disponen en lechos torrenciales; se acumulan en las ensenadas por la acción de transporte y sedimentación de los torrentes y el oleaje.

El macizo del cabo de Creus forma parte de un edificio estructural orogénico profundo en el que se han desarrollado procesos petrogenéticos (anatexia, metamorfismo y magmatismo), así como estructuras de plegamiento con esquistosidades asociadas y cizallas. La península, modelada y articulada por la fuerza erosiva del oleaje, el viento húmedo y salobre, y los torrentes presenta relieves de gran espectacularidad.

La dureza y compacidad de las rocas ha propiciado la formación de acantilados. El oleaje erosiona la base rocosa, con el hundimiento consiguiente de la parte superior y la formación de un acantilado. Se produce también el retroceso de la línea de costa, tal como atestiguan los pequeños islotes. Las calas del litoral corresponden a formas erosivas; en su creación intervienen, por un lado, los torrentes que surcan el macizo (que se encajan en materiales erosionables o según líneas estructurales como fracturas, zonas de cizalla y ejes de pliegues), y, por otro, el oleaje marino.



2. Granates en pegmatita que han crecido en la dirección de emplazamiento del magma pegmatítico, en la zona de Tudela.

3. Alveolos y taffone producidos por los aerosoles salinos y el oleaje en esquistos cambro-ordovícicos, en los acantilados de Tudela.



4. Cuarcitas plegadas (orogénesis Herciniana) que incluyen niveles carbonosos, en el lugar denominado “can Rabassers de Dalt”.

5. Esquistos cambro-ordovícicos con esquistosidad plegada (orogénesis Herciniana), de cala Prona.

XAVIER AURELL, FOTCIENCIA03/ICMAB-CSIC

# Redes eléctricas



# inteligentes

Massoud Amin
y Phillip F. Schewe



**Una red eléctrica que respondiese automáticamente a situaciones de emergencia reduciría el número de apagones. La situación en Estados Unidos ilustra los problemas actuales de la transmisión de electricidad**

Era el 14 de agosto de 2003, un típico día de calor en el Medio Oeste. Poco después de las dos de la tarde, en el norte de Ohio, varias líneas de la red de alta tensión, combadas por efecto de su elevada corriente, rozaron los árboles más altos y dejaron de conducir electricidad. Cuando sucede algo así, se disparan las alarmas en una sala de control de la compañía eléctrica local, donde los operadores colaboran con los de las regiones vecinas para redirigir el flujo de energía de modo que evite el lugar afectado.

Aquel día, sin embargo, el programa informático de alarma falló y los operadores locales no se enteraron del problema, que tampoco llegó al conocimiento de otros controladores que transferían enormes cantidades de energía de unas redes a otras a través de Ohio, Michigan, el nordeste de EE.UU. y Ontario. Las líneas de transmisión que rodeaban el lugar del fallo, ya a plena carga, se vieron obligadas a asumir una cuota de energía que rebasaba su límite de seguridad.

Para empeorar las cosas, las centrales eléctricas no generaban suficiente "potencia reactiva", una propiedad de los campos eléctricos y magnéticos que hacen circular la corriente por los hilos. Carentes de la potencia reactiva capaz de soportar la brusca variación de suministro, las sobrecargadas líneas de Ohio se interrumpieron a las 4:05 de la tarde. Acto seguido, una central eléctrica se paró y desestabilizó el sistema. Fueron cayendo en cascada más líneas y más centrales, mucho más deprisa de lo que podían detectar los operadores con los dispositivos, cargados de años, que vigilan la red eléctrica norteamericana, mucho más deprisa de lo que podían afrontar. Al cabo de ocho minutos, se habían quedado a oscuras 50 millones de personas en ocho estados de EE.UU. y dos provincias canadienses. Fue la mayor caída de energía en toda la historia de Norteamérica.

El desastre de 2003 fue además un ominoso presagio. A los dos meses se produjeron grandes apagones en el Reino Unido, Dinamarca, Suecia e Italia. En septiembre de 2003 se quedaron sin luz unos 57 millones de personas por complicaciones que afectaron al transporte de energía de Francia a Suiza y, después, a Italia. En EE.UU., el número total de cortes que afectan al menos a 50.000 abonados aumenta desde hace más de diez años.

RANDY LYHUS

Además del trastorno, los apagones son desastrosos para la economía. Los problemas seguirán empeorando hasta que no se revise por completo el sistema de transmisión que transporta la energía, desde las plantas generadoras hasta las subestaciones de las poblaciones cercanas. Hay que construir más líneas de alta tensión para satisfacer la creciente demanda que generan los climatizadores, ordenadores y aparatos recargables.

Pero quizá más importante aún sea dotar de más inteligencia a la red eléctrica. La mayoría de los aparatos que supervisan en Estados Unidos el transporte de electricidad se remonta al decenio de los setenta. Su calidad no es suficiente para registrar en tiempo real las incidencias —es decir, al mismo tiempo que se producen—, ni para aislar de modo automático los problemas antes de que se acumulen. Todo nodo de la red debería estar activo, dispuesto a responder y en comunicación con los demás nodos. Además, los operadores de las estaciones de control central reciben una información dispersa y retrasada no menos de 30 segundos; ello les impide reaccionar con rapidez suficiente para frenar las enormes cascadas que se inician.

Una red inteligente que se autocorrige —enterada de un problema naciente, se reconfigura ella misma para resolverlo— reduciría mucho los apagones y contendría el caos que pudiera crear un sabotaje terrorista. La energía pasaría de unas redes a otras con mayor eficacia, ahorrando, a las empresas eléctricas y a sus abonados, millones en el funcionamiento rutinario. Existen ya técnicas que permiten construir una red inteligente así; pruebas recientes demuestran su valor.

[El Consejo de Administración del Centro de Desarrollo Tecnológico e Industrial, adscrito al Ministerio de Industria, Turismo y Comercio español, aprobaba en febrero, dentro de la segunda convocatoria del Programa Cenit (Consorcios Estratégicos Nacionales de Investigación Técnica), el proyecto cuatrianual Denise, con un presupuesto de 30 millones de euros. Lo encabeza Endesa y engloba a 12 empresas y 7 organismos de investigación. Su objetivo fundamental es “sentar las bases de la red de distribución eléctrica inteligente, segura y eficiente del futuro”.]

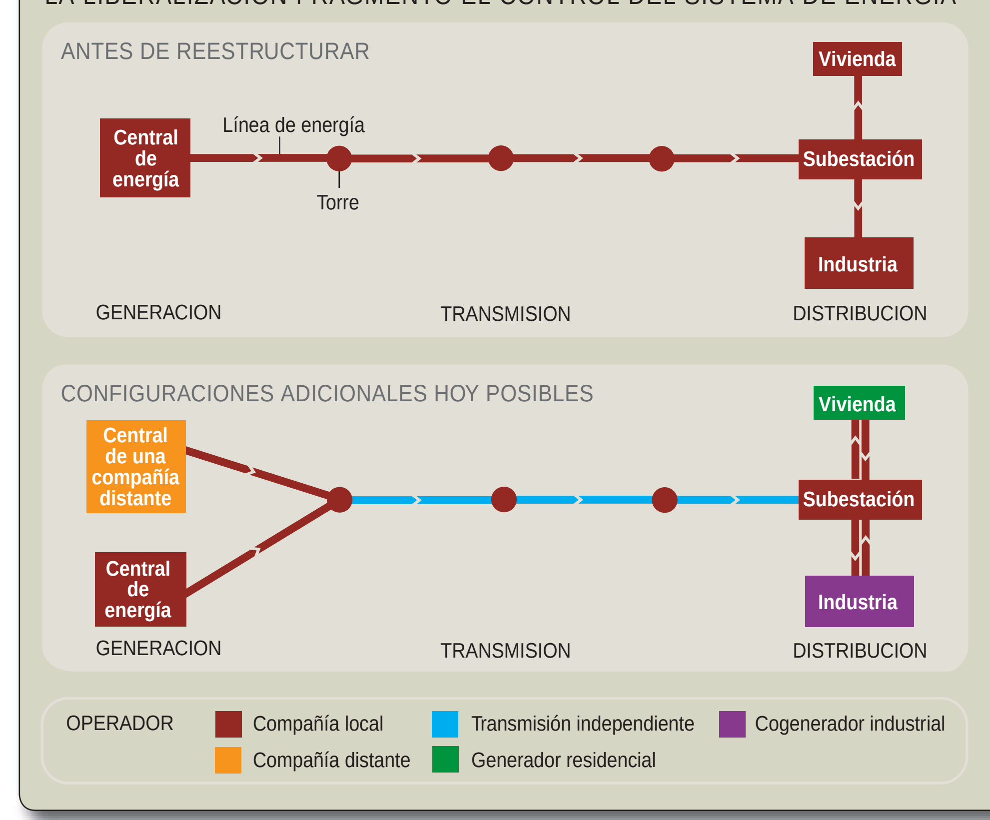
## Arrollados por el progreso

El sistema de transmisión se ha tornado vulnerable a los apagones porque desde hace más de un siglo se trabaja en reducir las pérdidas de energía. Sabemos que una parte de la energía eléctrica transportada por

## PROBLEMA: DEMASIADOS ACTORES Y POCA INVERSION

La reestructuración industrial del servicio eléctrico debida a la liberalización (*abajo*) es una de las principales razones del aumento de los apagones en EE.UU. (*página opuesta, gráfico inferior*). Cuando el control en una región determinada no está en manos de una sola compañía, la red eléctrica no se moderniza ni amplía para seguir el paso de la creciente demanda (*página opuesta, paneles del centro*).

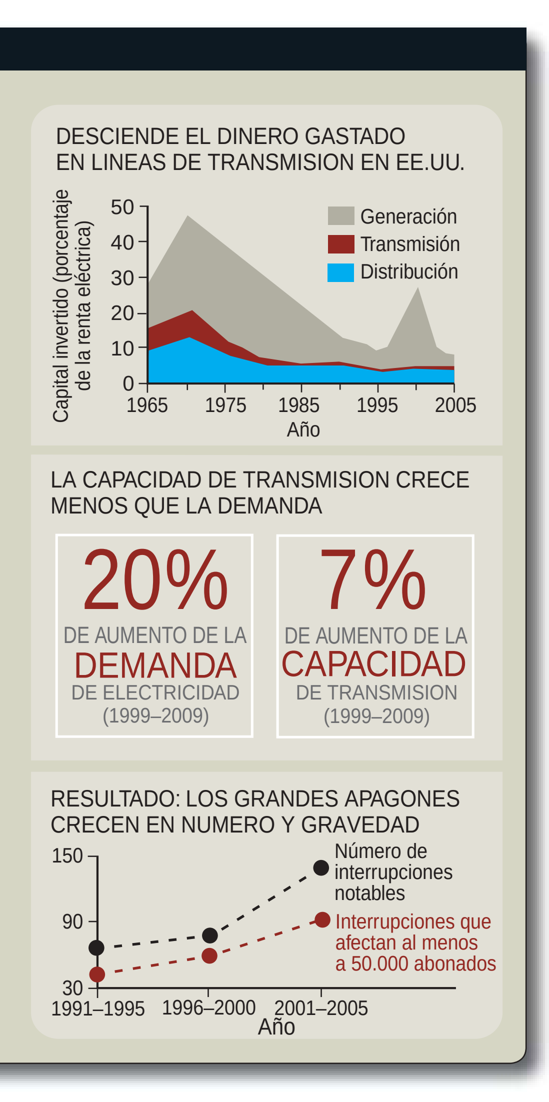
### LA LIBERALIZACION FRAGMENTO EL CONTROL DEL SISTEMA DE ENERGIA




JEN CHRISTIANSEN; FUENTES: UNIVERSIDAD DE MINNESOTA, INSTITUTO DE ELECTRICIDAD EDISON, NORTH AMERICAN ELECTRIC RELIABILITY CORP., DEPARTAMENTO DE ENERGIA DE EE.UU.

## Resumen/*Una red inteligente*

- La demanda de electricidad lleva decenios de crecimiento incesante. Pero las líneas que transportan energía desde las plantas generadoras hasta los abonados no han aumentado ni se han modernizado al mismo ritmo. De ahí que la red eléctrica esté sobrecargada y sea más propensa a los apagones, cada vez más frecuentes y graves.
- Aunque aumenten las líneas, se necesitará una red inteligente autocorrectora, que detecte precozmente los problemas locales y los corrija o aísle antes de que sus efectos se acumulen. Con ello se impedirían las caídas de energía en cascada que terminan produciendo apagones.
- Deben instalarse controladores digitales y dispositivos de comunicación en tiempo real en todas las líneas de transmisión, subestaciones, centrales de energía y centros de operaciones de compañías explotadoras.
- Los centros de operaciones necesitan ordenadores y programas actualizados que permitan a los controladores humanos hacerse cargo manualmente de la red inteligente si, pese a todo, se iniciara un apagón. Se ha de mejorar la formación de los controladores para que sepan reaccionar con rapidez.




hilos conductores se pierde en forma de calor. La pérdida depende de la intensidad de la corriente, por lo que conviene mantener ésta en un valor bajo y, en compensación, aumentar la tensión. Para abastecer de energía con mayor eficacia a consumidores lejanos se han tendido líneas cada vez más largas y a tensiones más elevadas. Estas líneas de alta tensión permiten interconectar las redes de distribución vecinas, facilitando que distintas compañías cooperen para mantener un delicado equilibrio entre la generación y la demanda de energía.

La interconectividad comporta, no obstante, ciertos riesgos. Entre ellos, la posibilidad de que la caída de un sector de la red se propague rápidamente a los demás. Un enorme apagón acaecido en 1965 en el nordeste de EE.UU. impulsó la creación del NERC (la Corporación de la Fiabilidad Eléctrica en Norteamérica) con miras a coordinar esfuerzos para mejorar la fiabilidad del sistema. Por todo el mundo existen organismos similares, como la Unión para la Coordinación de la Transmisión de Electricidad en Europa.

¿Cómo se explica entonces que la red estadounidense haya sido tan vulnerable a un fallo generalizado en 2003? Una razón fundamental es que se ha invertido muy poco en mejorar el sistema de transmisión. El súbito encarecimiento de los combustibles en los años setenta y un creciente desencanto ante la energía nuclear incitaron al Congreso a aprobar leyes con las que se pretendía incrementar la eficiencia mediante la libre competencia. Suscitaron en el sector un cambio radical, que vino a llamarse reestructuración. Antes de iniciarse ésta de veras en los noventa, la mayoría de las compañías realizaba en sus respectivas regiones las tres funciones principales: generación de energía en grandes centrales, transmisión a las subestaciones por líneas de alta tensión y distribución desde ellas a los abonados por líneas de baja tensión.

Muchos productores independientes venden hoy energía a corta o larga distancia por líneas de transmisión que no les pertenecen. Y al mismo tiempo, las compañías han vendido parte de sus activos, alentadas por la Comisión Federal Reguladora de la Energía, que quería estimular así la competencia. Poco a poco, el sector de la transmisión se ha convertido en una confusa amalgama de servicios regulados y liberalizados, bajo el control fragmentario de compañías diversas.

La generación, hoy liberalizada en gran medida, ha atraído a los inversores. Pero, al ser sólo parcial la liberalización del sistema de transmisión, la incertidumbre sobre su final les torna cautelosos. (La liberalización de la distribución en EE.UU. todavía está en pañales.) Entre tanto, aunque ya antes se hubiera transferido electricidad de unas redes a otras, fue a partir de los años noventa cuando se transmitieron energías mucho mayores a distancias largas. De ahí que circulen grandes volúmenes de energía por líneas en su mayoría construidas por compañías eléctricas locales varias décadas atrás.

Está propuesta una legislación federal que podría alentar mayores inversiones. Mas, aunque se incremente la capacidad de transmisión, seguirá habiendo apagones. La red eléctrica entera tiene que renovarse porque se han quedado anticuadas las técnicas de control, claves para detectar un ligero fallo de la línea o la posibilidad de una grave inestabilidad. Para que la red sea fiable, tiene que asemejarse a un avión de combate, en gran parte gobernado por sistemas autónomos que pasan a depender del control humano cuando, si no, ocurriría un desastre.

## Necesidad de actuaciones rápidas

La compleja instrumentación de un moderno avión de combate permite a los pilotos confiar en una red de sensores y controles automáticos que recogen rápidamente información y actúan en consecuencia. Por suerte, disponemos de la informática y el nuevo equipamiento necesario para gestionar la red eléctrica de un modo semejante, reencaminando instantáneamente el flujo de energía y cerrando las plantas generadoras.

Pese a todo, reconfigurar un sistema con muchas interconexiones es un reto durísimo. La mayoría de las centrales de energía y líneas de transmisión cuentan con un sistema de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA, por sus siglas en inglés). Lo componen sensores y controladores sencillos. Desempeña tres funciones esenciales: adquisición de datos, control de las plantas de energía y presentación de alarmas. Permite a los operadores de las estaciones de control realizar ciertas tareas, así la apertura o el cierre de un disyuntor de circuito. SCADA vigila los conmutadores, transformadores y unos pequeños dispositivos, los controladores de lógica programable y las unidades de control remoto, instalados en plantas generadoras, subestaciones e intersecciones de líneas de transmisión y distribución. El sistema devuelve información o señales de alarma a los operadores por canales de telecomunicación.

Las técnicas del SCADA, sin embargo, datan de 40 años atrás. En buena medida, el sistema es demasiado lento para los problemas actuales y no detecta ni controla un número

suficiente de los componentes que rodean la red. Aunque permita coordinar en algún grado la transmisión entre distintas redes, el proceso no puede ser más lento: todavía ha de recurrir a que se llamen por teléfono los operadores situados en los centros de control respectivos, especialmente en situaciones de emergencia. Y lo peor de todo es que la mayoría de los controladores de lógica programable y las unidades de control remoto se concibieron antes de que se establecieran normas de interoperabilidad para el sector eléctrico en su conjunto; por esa razón, los protocolos de control de redes vecinas resultan a menudo incompatibles. Las compañías, mientras se acercan cada vez más al límite de la estabilidad, siguen empleando controles de los años sesenta.

## La red inteligente autocorrectora

En consecuencia, ningún operador ni compañía explotadora puede por su cuenta estabilizar o aislar un fallo en la transmisión. La gestión en tiempo real de una red moderna exige automatizar mucho más su vigilancia y una interacción más fluida entre operadores humanos, sistemas informáticos, redes de comunicación y sensores de recogida de datos que han de instalarse por todas partes en las plantas y las subestaciones. Para que la operación sea fiable, es preciso intercomunicar estos nodos, en ambos sentidos, por múltiples enlaces de alta velocidad de datos —hoy inexistentes—, y disponer de medios de computación más potentes en el centro de control. Por último, distribuir por toda la red procesadores inteligentes capaces de reconfigurar automáticamente los flujos de energía al detectarse indicios de que se avecina un apagón.

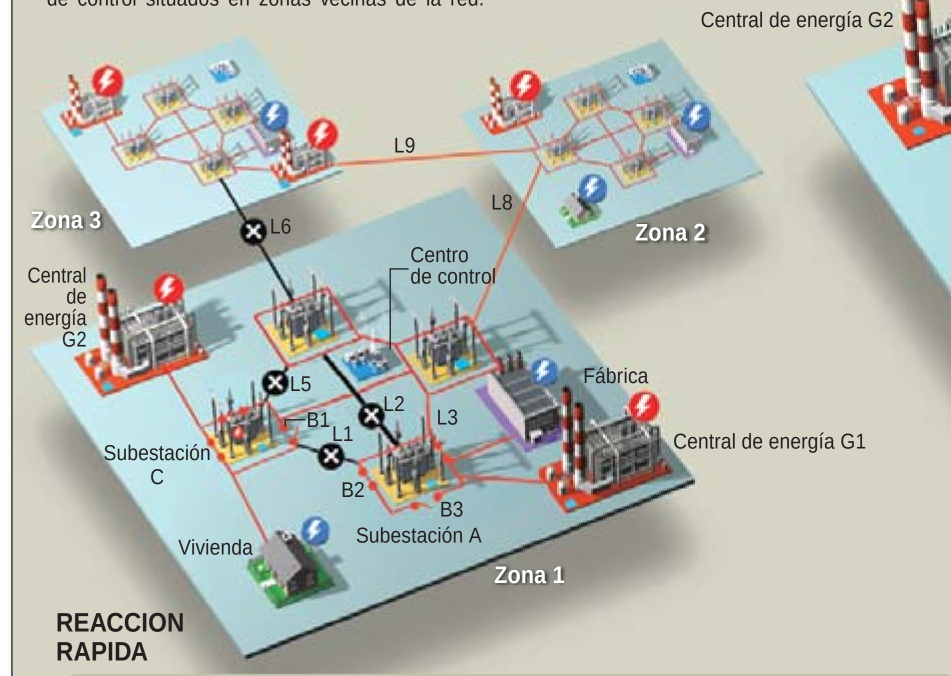
Poner a salvo la red eléctrica comienza por un tipo diferente de diseño del sistema. Recientes investigaciones en una diversidad de campos —sistemas dinámicos no lineales, inteligencia artificial, teoría de juegos e ingeniería informática— han conducido a una teoría general aplicable al diseño de sistemas complejos que se adapten a condiciones cambiantes. Las técnicas matemáticas y computacionales desarrolladas en esta joven disciplina aportan nuevos instrumentos para la ingeniería de la red.

Unos grupos de trabajo del sector, entre ellos el que dirigía uno de los autores (Amin) en el Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica (EPRI) en Palo Alto, California, han propuesto sistemas complejos adaptables para grandes redes de ámbito regional. A escala de demostración, varias compañías han instalado unidades de control remoto y controladores programables inteligentes, capaces de ejecutar de un modo autónomo procesos sencillos sin pasar previamente por un controlador humano, o susceptibles de que los operadores los reprogramen a distancia. Se necesita extender mucho más su implantación.

Para una mejor construcción de una red inteligente autocorrectora, hay que ambicionar tres grandes objetivos. El primero, y más fundamental, es la vigilancia y reacción en tiempo real. Una retícula de sensores tendría en observación los parámetros eléctricos —tensión y corriente—, así como el estado de los componentes esenciales. Las mediciones obtenidas permitirían

## SOLUCION: UNA RED INTELIGENTE QUE SE AUTOCORRIGE

Imaginemos que una tormenta inutiliza las líneas eléctricas L5 y L6. Este suceso, en condiciones normales, pondría en marcha una reacción en cadena que dejaría sin luz a la Zona 1. Pero una red inteligente aislaría y corregiría el fallo del modo que se ilustra aquí. La acción se inicia cuando un ordenador del centro de control simula las acciones correctoras en menos de medio segundo y envía instrucciones a ordenadores de control situados en zonas vecinas de la red.




### REACCION RAPIDA

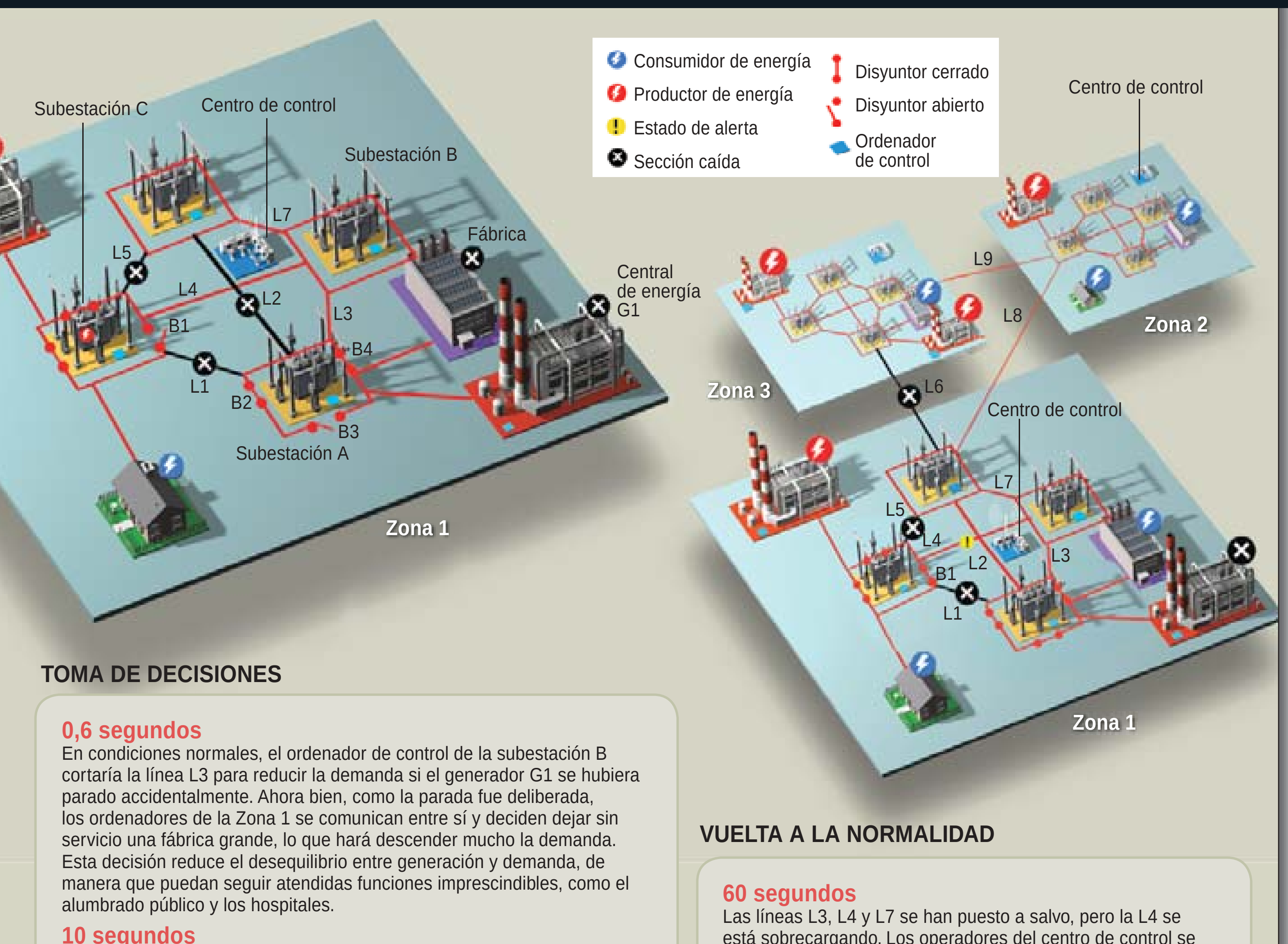
**0,04 segundos después**
La caída de L5 y L6 produce un fallo en la línea L1. Los ordenadores de control ordenan a los disyuntores B1 y B2 que abran para aislar el fallo, pero B2 se queda bloqueado en la posición de cierre.

**0,1 segundos**
El generador G1 acelera automáticamente para atender la demanda que proviene de la pérdida de G2 producida por los fallos de L5 y L1. G1 también acelera para intentar mantener la tensión de la línea en toda la Zona 1 a los 60 hertz exigidos.

**0,4 segundos**
El ordenador-simulador de control de la subestación A ordena al disyuntor B3 que abra para proteger la subestación de los daños producidos por el paso de una corriente excesiva. B3 abre, cortando la línea L2. G1 acelera aún más para compensar.

**0,5 segundos**
El centro de control detiene el generador G1 para evitar el daño de una aceleración excesiva.

DON FOLEY; FUENTE: INSTITUTO DE INVESTIGACION DE LA ENERGIA ELECTRICA




**TOMA DE DECISIONES**

**0,6 segundos**
En condiciones normales, el ordenador de control de la subestación B cortaría la línea L3 para reducir la demanda si el generador G1 se hubiera parado accidentalmente. Ahora bien, como la parada fue deliberada, los ordenadores de la Zona 1 se comunican entre sí y deciden dejar sin servicio una fábrica grande, lo que hará descender mucho la demanda. Esta decisión reduce el desequilibrio entre generación y demanda, de manera que puedan seguir atendidas funciones imprescindibles, como el alumbrado público y los hospitales.

**10 segundos**
Al cabo de algunos segundos, sin embargo, el ordenador de la subestación B detecta que la tensión empieza allí a oscilar, rebasando los márgenes de seguridad. La causa es un desequilibrio todavía notable, que amenaza con dañar el equipo en las líneas L3, L4 y L7. En vez de cortar esas líneas (que sería la respuesta tradicional), los ordenadores de la zona pasan a manual el control del generador G2, avisando a los operadores humanos del centro de control de la Zona 1 para que eleven la generación o reduzcan la carga. Harán lo uno o lo otro.

**VUELTA A LA NORMALIDAD**

**60 segundos**
Las líneas L3, L4 y L7 se han puesto a salvo, pero la L4 se está sobrecargando. Los operadores del centro de control se comunican vía satélite con los del centro de control de la Zona 2 y les piden ayuda. Los operadores de la Zona 2 envían energía por la línea L8; además, instruyen a los ordenadores de control de su sector para que modifiquen ligeramente los flujos de energía a fin de compensar esa repentina exportación. Una vez que las brigadas ambulantes han reparado las líneas averiadas L5 y L6, los ordenadores reponen la L1 y la central G1. Volverá a circular la energía en las tres zonas con normalidad.

que el sistema se autoajustara continuamente a un estado óptimo.

La segunda meta es la anticipación. El sistema debe buscar sin descanso problemas susceptibles de provocar mayores trastornos, como podría ser el sobrecalentamiento de un transformador. Los ordenadores evaluarían los indicios de problema y sus posibles consecuencias. Después, determinarían las acciones correctoras, simularían la efectividad de cada una de ellas y presentarían las respuestas más útiles a los operadores humanos; éstos ejecutarían de inmediato la acción oportuna poniendo en juego los numerosos medios de control automatizado de la red. Tal capacidad se conoce por simulación rápida anticipada.

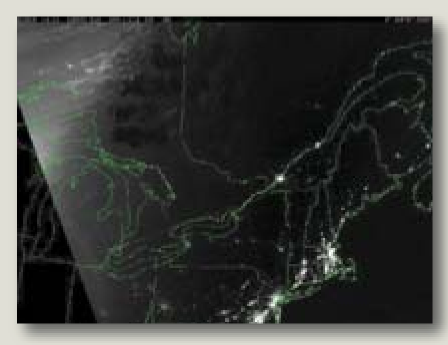
El aislamiento es el tercer objetivo. Si apareciesen averías, la red entera se descompondría en "islas", cada una a cargo de sí misma. Cada isla reorganizaría sus plantas generadoras y flujos de energía. Esto tal vez produciría fluctuaciones de tensión e incluso cortas interrupciones, pero impediría las caídas en cascada que crean grandes apagones. A medida que las brigadas de operarios fueran reparando las averías, los controladores humanos prepararían cada isla para que se incorporaran sin brusquedad a la red principal. Los controladores y sus ordenadores funcionarían a la manera de una red distribuida: se comunicarían por medio de microondas, fibras ópticas o las propias líneas eléctricas. Una vez restaurada la circulación de energía, el sistema volvería a iniciar su autooptimización.

Para transformar nuestra infraestructura actual en este tipo de red

## EL FACTOR HUMANO

Si un apagón local empezara a propagarse más allá de lo que puede controlar automáticamente una red inteligente, los operadores de los centros de control regionales podrían intentar detener la reacción en cadena. Para conseguirlo, necesitarían una información sobre la red completa y actualizada al segundo, unos protocolos informáticos coherentes, procedimientos de respuesta preestablecidos y una sólida capacitación. Ninguno de estos requisitos se cumplía cuando el apagón de 2003 se extendió: así lo demuestran los primeros minutos de conversación (grabada y publicada por el Consejo de Fiabilidad Eléctrica de Norteamérica) entre los controladores de regiones vecinas, que intentaban ayudarse unos a otros para equilibrar unos flujos de energía que ya escapaban a su control.





IMAGENES POR SATELITE del nordeste de Estados Unidos por la noche, antes (*izquierda*) y después (*derecha*) del apagón de 2003.

### OPERADORES POCO CAPACITADOS, FALTA DE DATOS EN TIEMPO REAL

Operador de AEP: "¿Qué ves en la [línea] Sammis-Star?"
Operador de PJM: "¿Perdón? La Sammis-Star, sí, me está marcando 960 y está iluminada en azul… Dime qué significa eso en tu máquina."
AEP: "¿Azul? Normal…. Pero ¿eso es lo que marca?"
PJM: "960, eso es lo que marca."
AEP: "Ese circuito acaba de caer. South Canton-Star."
PJM: "¿Ha caído?"
AEP: "Ha caído y se ha vuelto a cerrar…"

### PROTOCOLOS INFORMATICOS INCOHERENTES, INEXISTENCIA DE PLANES DE EMERGENCIA

PJM: "Todavía veo corriente por esas dos líneas. ¿Estoy viendo datos estimados?"
AEP: "Probablemente."
PJM: "Sí..., está detrás, vale. ¿Puedes ver los datos en bruto?"
AEP: "Sí..., está abierta. South Canton-Star está abierta… Tenemos más problemas... Están cayendo otras. East Lima y New Liberty ya cayeron. Mira eso… ¡Por Dios, en qué lío estoy…!"
PJM: "Y yo, y yo... ¿Qué vamos a hacer ahora?"

### INFORMACION INCOMPLETA, FALTA DE DATOS EN TIEMPO REAL

PJM: "… parece que hayan perdido la línea 345 South Canton-Star. No sé si podrías mirarme lo que lleva la línea Sammis-Star."
MISO: "Bien, vamos a ver lo que tengo. Sé que First Energy también perdió su línea Juniper."
PJM: "¿Que la han perdido?"
MISO: "Y que hace poco la han podido controlar aquí."
PJM: "¿Y cuándo falló? Podría haber sido…"
MISO: "No lo sé todavía…"
PJM: "Y ahora mismo veo que los sistemas de AEP dicen que Sammis a Star está en 1378…"
MISO: "Deja que vea. A ver si lo encuentro aquí, si es posible… Veo que está abierta South Canton-Star, pero estamos recibiendo datos de 1199, y me pregunto si eso no es justo de después."
PJM: "Puede".

PJM: Pennsylvania–New Jersey–Maryland
AEP: American Electric Power
MISO: Operador de Midwest Independent System

inteligente autocorrectora se han de aplicar varias técnicas. El primer paso consistiría en integrar un procesador en cada conmutador, disyuntor, transformador y barra colectora (los gruesos conductores que transportan electricidad desde los generadores). Cada línea de transmisión deberá luego equiparse con un procesador capaz de comunicarse con los procesadores restantes, cada uno de los cuales seguirá la actividad de su correspondiente pieza del rompecabezas gracias a los sensores incorporados en sus sistemas.

Con todos los elementos de equipo ya en observación continua, los millones de conmutadores electromecánicos actualmente en uso deberían reemplazarse por circuitos de estado sólido de electrónica de potencia, a los que a su vez habrá que reforzar para que soporten las tensiones de transmisión más altas, por encima de 345 kilovolt. El salto cualitativo de los dispositivos analógicos a los digitales permitirá el control digital de la red entera, única manera de que la red se observe y repare ella misma.

Una transición completa requiere, además, la digitalización de las cortas líneas de baja tensión que distribuyen energía a viviendas y centros de actividad económica. Es esencial reemplazar los contadores eléctricos de hace varias décadas, basados en engranajes giratorios, por contadores digitales que no sólo midan la corriente que entra en un edificio, sino también la que devuelve al exterior. Permitiría una evaluación mucho mejor de la potencia activa y reactiva que devuelven a la red los productores independientes. Además, las compañías detectarían así alteraciones muy localizadas, posiblemente un aviso precoz de problemas que tal vez vayan en aumento, lo que mejoraría la simulación anticipada. Y posibilitaría el cobro a los abonados de tarifas variables con la hora que incentiven el uso de aparatos y máquinas en horas de escasa carga, que pueden ir cambiando de un día a otro; reduciría los picos de demanda que desestabilizan la red.

[En un plazo de cinco años a partir de enero de 2008 se sustituirán en España 20 millones de contadores antiguos por contadores electrónicos.

ADMINISTRACION NACIONAL DE OCEANOS Y ATMOSFERA



ESTE ES UN CENTRO DE CONTROL regional simulado. En él, unos investigadores del Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico ensayan prototipos de programas informáticos que aportarían a los operadores humanos información sobre la red en tiempo real, sin la cual no se puede detener un apagón incipiente antes de que se extienda.

LABORATORIO NACIONAL DEL NOROESTE DEL PACIFICO

Este cambio permitirá cobrar tarifas variables según la hora.]

A diferencia de un simple contador, ese portal digital de energía permitirá que la inteligencia de la red viaje en uno y otro sentido; los consumidores reaccionarían a las variaciones de la tarifa. El portal es un instrumento para avanzar desde la situación actual, en la que la electricidad se trata como una mercancía, hacia una nueva era de servicios energéticos, no menos diversos que los ofrecidos hoy en el dinámico mercado de las telecomunicaciones.

El proyecto de EPRI para el diseño de una red inteligente prototipo, la Iniciativa de Redes/Sistemas Complejos Interactivos, se desarrolló de 1998 a 2002. Intervinieron seis consorcios de investigación universitarios, dos compañías eléctricas y el Departamento de Defensa de EE.UU. Ha dado lugar posteriormente a varios intentos, aún en marcha, del Departamento de Energía de EE.UU., la Fundación Nacional de la Ciencia y los propios Departamento de Energía y EPRI, de elaborar un sistema nervioso centralizado para la red eléctrica. Tomados en su conjunto, los resultados demuestran que se puede hacer funcionar la red cerca del límite de estabilidad siempre que los operadores conozcan en todo momento lo que ocurre en cualquier lugar. El operador observará cómo está cambiando el sistema y cómo le está afectando la situación meteorológica. Tendrá, asimismo, un criterio firme sobre la mejor manera de mantener, segundo a segundo, el equilibrio entre la generación y la carga (demanda) de energía.

A modo de ejemplo, uno de los aspectos del programa Intelligrid de EPRI consiste en dar a los operadores más medios de prever situaciones de inestabilidad a gran escala. Los sistemas de SCADA actuales tardan al menos 30 segundos en evaluar las muestras aisladas del funcionamiento del sistema que pueden detectar; es como pilotar un avión mirando a un espejo retrovisor nublado y no al espacio despejado que se tiene delante.

En el Proyecto de Simulación y Modelación Rápidas del EPRI se efectúan simulaciones anticipadas, más deprisa que en tiempo real, con el fin de adelantarse a los problemas, a la manera de un maestro del ajedrez que decide su jugada previendo varios movimientos del adversario.

Esta modelación de la red por sí misma, esa "conciencia de sí" de la red, evitaría trastornos mediante análisis del tipo "¿qué ocurriría si...?" También facilitaría la autorregeneración de la red, es decir, la adaptación a las nuevas condiciones que siguen a una interrupción o una agresión, del mismo modo que un avión de caza reconfigura sus sistemas para mantenerse en vuelo, aunque haya sufrido daños.

## Quién debería pagarlo

Desde un punto de vista puramente técnico, la red inteligente autocorrectora ya no es un sueño lejano. Otra cosa es, sin embargo, encontrar el dinero para construirla.

Sin duda, el coste de la red sería alto, mas no prohibitivo, si se lo compara con otras inversiones históricas. El EPRI estima que la instalación y pruebas de un sistema de transmisión y distribución de energía a través de todo EE.UU. consumiría anualmente 13.000 millones de dólares (unos diez mil millones de euros) durante diez años, un 65 por ciento más de lo que ahora invierte la industria por año. Otros estudios predicen 10.000 millones de dólares/año durante un decenio al menos. También habrá que gastar dinero en la capacitación de operadores. Estas cifras impresionan, pero las pérdidas económicas infligidas en EE.UU. por todas las interrupciones se estiman entre 70.000 y 120.000 millones de dólares por año. Y aunque sólo cada diez años se produce un gran apagón, no hay día en que no se queden sin electricidad 500.000 abonados estadounidenses durante dos o más horas.

Por desgracia, la investigación y desarrollo nunca ha estado peor dotada de fondos en la industria del suministro eléctrico que ahora; gasta en ese capítulo menos que cualquier sector industrial importante, a excepción del de la pulpa y el papel. Conseguir fondos es un desafío enorme porque las compañías deben atender demandas contrapuestas de abonados y reguladores, y al mismo tiempo cuidar los intereses de sus accionistas, que tienden a limitar sus inversiones a los beneficios a corto plazo.

Hay que tener en cuenta otros factores: ¿A partir de qué nivel de amenaza terrorista le corresponde al gobierno hacerse cargo de la pro-

tección de la red? Si las subidas de tarifa no son admisibles, ¿cómo se las arreglará una compañía eléctrica para conseguir dinero? La mejora de la infraestructura energética requiere compromisos a largo plazo de inversores pacientes y el trabajo conjunto de todos los sectores pertinentes, públicos y privados.

El Gobierno de EE.UU. tal vez reconozca ya la necesidad de actuar. La Oficina de Política Científica y Tecnológica de la Casa Blanca y el Departamento de Seguridad Nacional declararon recientemente que "una infraestructura autocorrectora" era una de las tres estrategias clave de su Plan Nacional de Investigación y Desarrollo en Pos de la Protección de Infraestructuras Esenciales.

La supervisión a escala nacional puede ser muy necesaria, dado el gran obstáculo que supone la falta de coordinación actual en la toma de decisiones. Los derechos de cada estado de la nación y las reglamentaciones de sus comisiones de servicios públicos sofocan la motivación de cualquier compañía o grupo de compañías para acometer un proyecto a escala nacional. A menos que se establezca una colaboración entre todos los estados de EE.UU., la nacionalización forzosa del sector será el único modo de crear una red eléctrica inteligente.

Está en juego que las infraestructuras críticas del país puedan seguir funcionando con fiabilidad y seguridad. Como muy poco, un sistema de transmisión autocorrector debería reducir al mínimo las consecuencias de una acción terrorista que pretenda "volar" la red. Se pueden evitar o minimizar los apagones, contener los sabotajes, reducir las interrupciones y distribuir electricidad a todo el mundo con mayor eficacia.

De haber estado en servicio una red inteligente autocorrectora cuando falló la línea de Ohio en agosto de 2003, las consecuencias tal vez hubieran sido muy distintas. Ante todo, los dispositivos de prevención de fallos instalados en un extremo de la línea que se iba combando habrían detectado señales anormales; con esa información, habrían redirigido el flujo de energía que atravesaba o rodeaba esa línea para aislar la perturbación varias horas antes de que la línea fallase. La simulación anticipada habría descubierto que la línea era más propensa al fallo de lo normal. Un programa informático distribuido por toda la red y residente en los centros de control habría ejecutado modelos de situaciones de fallo con el fin de determinar la respuesta correctora ideal. Los operadores habrían aprobado y llevado a cabo los cambios recomendados. Si, pese a todo, la línea hubiera tenido después algún fallo, la fluctuación de tensión habría sido descubierta por la red de sensores y comunicada a los procesadores de las subestaciones cercanas. Los procesadores habrían redirigido la energía a otras partes de la red. Un abonado del vasto territorio afectado sólo habría percibido un breve parpadeo de las luces. Y muchos ni siquiera habrían notado problema alguno.

## Los autores

**Massoud Amin** y **Phillip F. Schewe** llevan años promoviendo las redes eléctricas inteligentes. Amin enseña ingeniería eléctrica e informática en la Universidad de Minnesota, donde dirige el Centro para el Desarrollo de la Primacía Tecnológica. Cuando trabajaba en el Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica en Palo Alto, ideó los fundamentos de la "red autocorrectora". Schewe se halla adscrito al Instituto Americano de Física.

## Bibliografía complementaria

TECHNICAL ANALYSIS OF THE AUGUST 14, 2003, BLACKOUT: WHAT HAPPENED, WHY, AND WHAT DID WE LEARN? North American Electric Reliability Council, 2004.

TOWARD A SMART GRID: POWER DELIVERY FOR THE 21ST CENTURY. Massoud Amin y Bruce F. Wollenberg en *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 3, n.º 5, págs. 34-41; septiembre/octubre 2005.

THE GRID: A JOURNEY THROUGH THE HEART OF OUR ELECTRIFIED WORLD. Phillip F. Schewe. Joseph Henry Press, 2007.

# Nanomecánica de proteínas

La célula posee numerosos complejos proteínicos que operan como verdaderos dispositivos mecánicos, con auténticos motores y muelles que trabajan en un entorno que nos es poco familiar. Con el microscopio de fuerza atómica nos adentramos en sus entresijos

Mariano Carrión Vázquez

A la célula, unidad elemental de la vida, se la considera hoy en día una compleja factoría, llena de máquinas proteínicas que se encargan de la mayoría de las funciones biológicas. El desarrollo de nuevas técnicas suele preceder a grandes avances en el conocimiento. Gracias a la aplicación de las técnicas de la biología molecular y estructural estamos descubriendo, cada vez a mayor velocidad, las secuencias y estructuras de las proteínas que componen esa maquinaria. El análisis de su funcionamiento se limitaba hasta no hace mucho al estudio macroscópico, propio de la bioquímica clásica, de las propiedades medias de vastas poblaciones moleculares en el rango submolar: se observaban a la vez miles de trillones de moléculas. Una técnica de registro eléctrico, el "pinzamiento de membrana", constituyó la avanzadilla que permitió a la neurobiología estudiar por primera vez las propiedades —eléctricas— de moléculas y complejos proteicos individuales; en concreto, de los canales iónicos, proteínas de la membrana celular que, a modo de compuertas, se abren o cierran para controlar el paso de iones [*véase* "La técnica del pinzamiento de membrana", de Erwin Neher y Bert Sakmann; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1992].

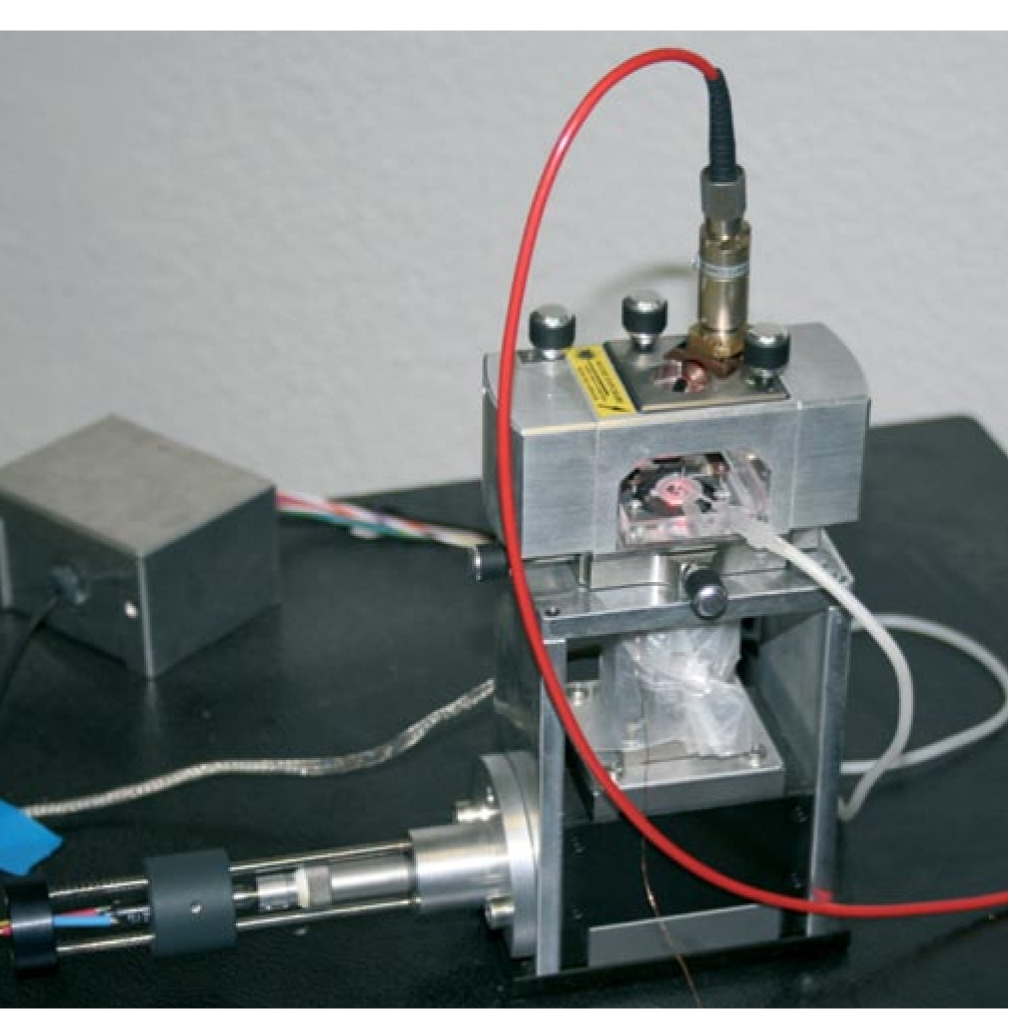
La exploración de las propiedades mecánicas de las proteínas ha tenido que esperar más tiempo. Sin embargo, en la actualidad, tras la aparición de la nanotecnología, disponemos de una primera generación de instrumentos para la manipulación y análisis mecanoquímico de las moléculas de proteína una a una. De los más utilizados es el microscopio de fuerza atómica (MFA). Se trata de una técnica dinámica que nos posibilita el estudio directo del funcionamiento interno de las máquinas biológicas, en condiciones fisiológicas, con una resolución sin precedentes y en tiempo real.

## Liliput convulso

En esas máquinas proteínicas encontramos componentes (motores, muelles, palancas, ejes, rotores, pestillos, bisagras e interruptores) muy similares a los fabricados por el hombre. Una diferencia palmaria entre las máquinas naturales y los artefactos reside en el tamaño. Las máquinas moleculares son tan diminutas (miden escasos nanómetros, millonésimas de milímetro), que las fuerzas térmicas dominan su funcionamiento a través de las constantes colisiones con las moléculas de agua, aún más pequeñas. Contrasta con las reglas de juego que rigen nuestro mundo macroscópico, donde el peso y la inercia de los cuerpos son dominantes.

Las fuerzas térmicas convierten la célula en un mundo que, a escala nanoscópica, parece caprichoso y extravagante. Las moléculas de proteína en solución acuosa se encuentran bombardeadas sin cesar por un vendaval de moléculas de agua que las someten a un "baile" continuo y frenético: el "movimiento browniano", que Albert Einstein logró explicar en términos puramente fisicoquímicos.

La magnitud de estas fuerzas depende de la temperatura del fluido; es proporcional a $kT$ (la temperatura, medida en kelvin, por la constante $k$ de Boltzmann). A temperatura ambiente, la energía térmica equivale a unos cuatro piconewton·nanómetro (4pN·nm), esto es, 0,6 kilocalorías por mol en las unidades "macroscópicas" habituales de la bioquímica. (Un piconewton, o pN, es la diezbillonésima parte del peso de un objeto de un kilogramo de masa.) Ahora bien, por lo que se refiere a la energía concreta que cada proteína recibe en cada mo-



1. ESTE MICROSCOPIO DE FUERZA ATOMICA no comercial, especializado en la espectroscopía de fuerza, se utiliza en el laboratorio del autor. De arriba abajo se pueden distinguir el sistema láser (el cilindro vertical), la cabeza transductora (la pieza horizontal que incluye la celda de fluidos, que a su vez lleva el sensor de fuerzas) y el posicionador piezoeléctrico (pieza vertical) sobre el que se monta la muestra. No se ven aquí las controladoras de espectroscopía e imagen ni el ordenador asociado, que permiten la adquisición de los datos y su análisis.

MARIANO CARRION VAZQUEZ

mento, no podemos predecir su valor exacto; éste fluctúa sin cesar y de manera estocástica. Hemos, pues, de limitarnos a su valor probabilístico.

Para poder funcionar en su nanocosmos aparentemente caótico, las máquinas proteicas han evolucionado en este sentido: el mantenimiento de su estructura y los cambios de conformación experimentados durante su funcionamiento normal han de requerir energías superiores a esas fluctuaciones. De esta manera, las proteínas evitan quedar a merced de las fluctuaciones. Pero la resistencia al cambio de forma tampoco debe exceder demasiado los valores de la energía térmica, dado que los cambios de conformación funcionales deben gozar de cierta probabilidad de ocurrir, sin que ello suponga un gasto energético excesivo para la célula.

Las barreras térmicas que las proteínas oponen al cambio de forma se sitúan de ordinario entre 1 kT y 25 kT. Tales barreras, esenciales para la vida, garantizan la estabilidad térmica de las proteínas en lo que se refiere a su integridad, los cambios de conformación y las interacciones. Ese trío de estabilidades resulta imprescindible para el funcionamiento de muchas proteínas. Como veremos en la siguiente sección, algunas máquinas proteicas poseen, además, barreras mecánicas que les permiten mantener su estructura cuando, durante su funcionamiento, sufren estrés mecánico.

En la célula, la principal fuente de energía de que se valen las proteínas para superar todas estas barreras en los cambios de conformación necesarios para su función es la hidrólisis del adenosín trifosfato (ATP), combustible celular que proporciona unos 25 kT a temperatura ambiente por molécula. La propia máquina encargada de la síntesis de ATP, la enzima ATP-sintasa, es un motor giratorio muy eficiente, cuyo funcionamiento interno se ha determinado recientemente mediante el estudio de moléculas de proteína individuales con el microscopio de fluorescencia. Se ha caracterizado a otros motores proteicos mediante las pinzas ópticas, otra técnica de nanomanipulación; entre ellos podemos citar la ARN polimerasa, la miosina, la quinesina y la proteína portal del virus bacteriano Φ29. Este último es uno de los motores biológicos más potentes conocidos, capaz de generar fuerzas de hasta 57 pN durante el empaquetamiento del ADN viral.

## La robustez de las proteínas

Las proteínas son cadenas de aminoácidos engarzadas por enlaces peptídicos. Por eso se las llama también cadenas polipeptídicas. Su estructura primaria consiste en la mera sucesión de aminoácidos y enlaces. Los plegamientos regulares de la cadena forman su estructura secundaria. Hay dos tipos básicos de estructura secundaria. Uno de ellos presenta una disposición helicoidal cilíndrica; recibe el nombre de hélices $\alpha$. El otro, las hebras $\beta$, son cadenas extendidas que tienden a asociarse formando planos zigzagueantes que se denominan láminas $\beta$. En estos dos tipos, las secciones del esqueleto peptídico se enlazan mediante puentes de hidrógeno, enlace mucho más débil y muy común en biología. La estructura terciaria consiste en los plegamientos adicionales que sufren las estructuras secundarias.

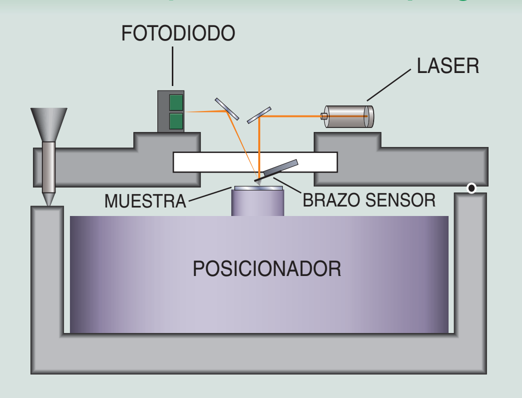
Una fuerza mecánica aplicada convenientemente a una molécula de proteína tenderá a desplegarla. Podemos llevar esto a cabo mediante el MFA si, una vez anclada la proteína por dos puntos, tiramos de uno de ellos para desplegarla (*véase el recuadro* “El microscopio de fuerza atómica

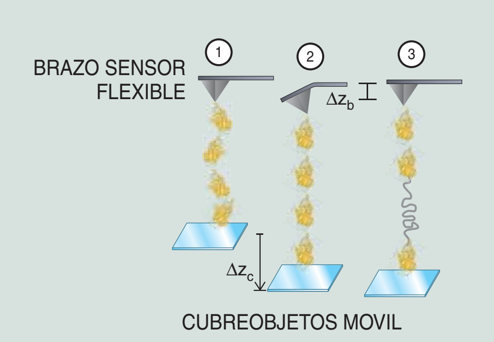
y la rotura del plegamiento de proteínas”). Gracias a un brazo flexible, con sensibilidad en el rango de los pN, y a un posicionador piezoeléctrico, capaz de producir desplazamientos con precisión por debajo del nanómetro, esta técnica permite detectar y medir la estabilidad mecánica de las barreras de resistencia que presenta una proteína al estiramiento, así como su localización.

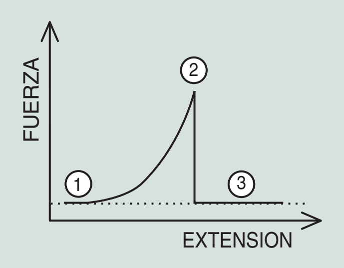
Aunque el número de proteínas analizadas mediante el MFA es todavía demasiado escaso para extraer conclusiones generales sólidas, se han observado ya ciertas tendencias, tanto estructurales como funcionales. Empecemos por la relación entre la estabilidad mecánica y la estructura de las proteínas. Según parece, tanto las proteínas desestructuradas como las ricas en espirales β (estructura secundaria característica de proteínas elásticas como la elastina y la región PEVK de la titina) son las que menor estabilidad mecánica presentan. Les siguen en orden creciente de estabilidad mecánica las proteínas ricas en hélices-α simples (calmodulina y lisozima del virus T4), las hélices-α trenzadas (espectrina y brazo de la miosina II), las proteínas ricas en láminas β con puentes de hidrógeno paralelos a la dirección de la fuerza (dominio C2A de sinaptotagmina) y, finalmente, las láminas β que presentan puentes de hidrógeno en disposición perpendicular a la fuerza (dominios de inmunoglobulina de la titina, fibronectina y tenascina). En estas últimas se han identificado barreras mecánicas formadas por puentes de hidrógeno estratégicamente situados: actúan a modo de un “velcro molecular” que preserva la integridad de la proteína mientras no se sobrepase su estabilidad mecánica (en una población de moléculas, el valor promedio de la fuerza necesaria para su rotura).

Y pasemos ahora a la relación de la estabilidad mecánica con la función de las proteínas. El MFA se ha aplicado al análisis de las propiedades mecánicas de proteínas que se piensa están sometidas a estrés mecánico, tanto de los citoesqueletos sarcomérico (titina, brazo de la miosina II) y cortical (espectrina, filamina A) como de la interfase célula-célula (tenas-

## El microscopio de fuerza atómica y la rotura del plegamiento de proteínas



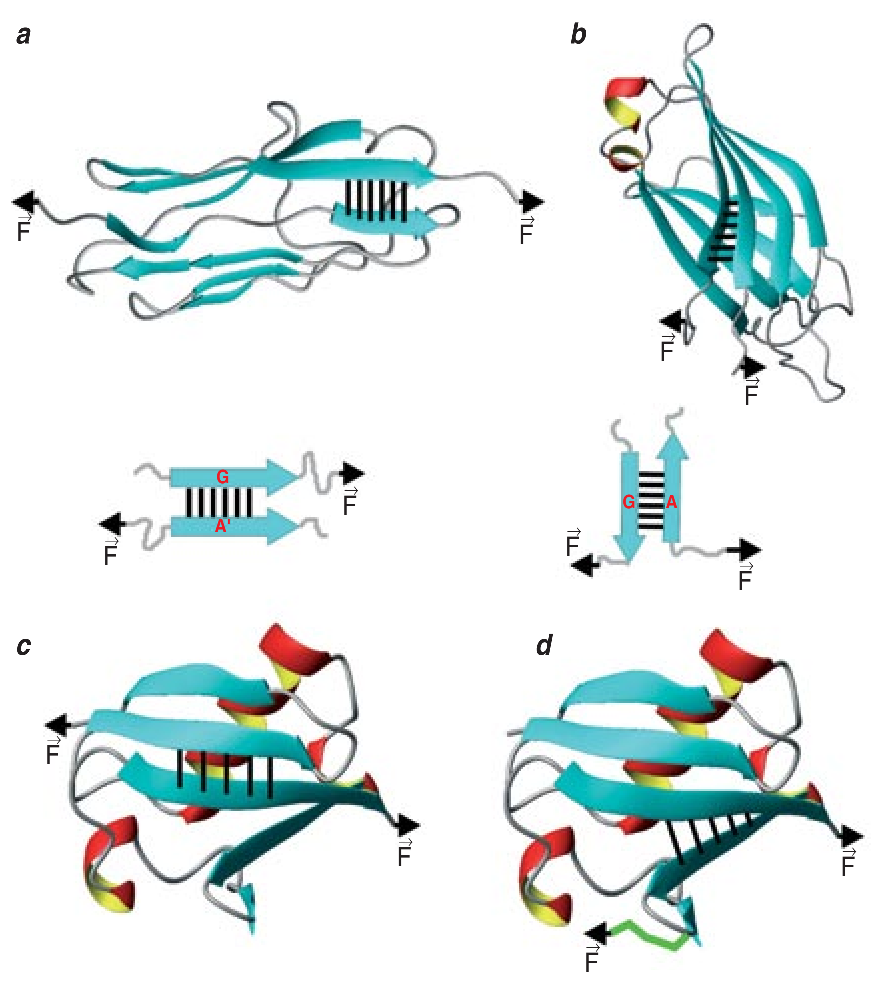




El microscopio de fuerza atómica (MFA) es uno de los instrumentos más utilizados para la manipulación y análisis mecánico de moléculas individuales de proteína. Se trata de un transductor mecanoeléctrico; es decir, un dispositivo que mide fuerzas mediante la conversión de energía mecánica en eléctrica. Su principio físico es similar al de un tocadiscos. En el modo de imagen, el más conocido, la punta de un brazo sensor flexible rastrea una superficie para describir la topografía mecánica de la misma, como un ciego explora el mundo con el bastón. En el modo de medición de fuerzas (o “espectroscopía de fuerzas”), un segmento de la proteína a analizar (de ordinario una poliproteína, constituida por repeticiones de la proteína que generan señales periódicas que permiten identificar inequívocamente moléculas individuales) se ancla, mediante procedimientos físicos o químicos, por dos puntos: a un cubreobjetos móvil y a un brazo sensor flexible. En este “circuito mecánico”, el desplazamiento $\Delta z_c$ del cubreobjetos, efectuado mediante un posicionador piezoeléctrico que posee una resolución en el rango del angstrom (décima de nanómetro), estira la proteína, mientras el brazo sensor indica, con su propio desplazamiento $\Delta z_b$ la fuerza de resistencia que ésta ofrece (2). Las proteínas suelen presentar una sola estructura estable y bastante compacta. Se trata de la estructura nativa o plegamiento terciario. Al ir estirando una molécula de poliproteína, se genera una fuerza de resistencia (1) que culmina (2) con una relajación súbita al romperse ese plegamiento terciario (3). Cuando se representa gráficamente la fuerza en función del desplazamiento resulta un diente de sierra.

Este mecanotransductor actúa como sigue: un fotodiodo de dos canales, que detecta las variaciones en el ángulo de reflexión de un rayo láser que se dispara sobre la superficie del brazo sensor, convierte las oscilaciones mecánicas de éste en señales eléctricas. A su vez, previo calibrado del sensor flexible (conforme a su elasticidad lineal, que se atiene a la ley de Hooke, y a su respuesta térmica), las señales eléctricas se transducen a fuerzas. En el modo de medida de fuerzas, el MFA permite describir a escala nanométrica el despliegue mecánico de una proteína, gracias a la medición directa de las fuerzas (en piconewton, billonésimas del newton) y las distancias implicadas (en nanómetros).

cina, fibronectina, elastina). Aunque, como ya se ha dicho, el número de proteínas analizadas mediante este método es todavía escaso, observamos que las proteínas puramente elásticas (elastina, regiones PEVK y N2B de la titina, y brazo de la miosina II) presentan una resistencia mecánica muy baja y se comportan como muelles reversibles ante los cambios mecánicos. En cambio, las proteínas a las que se les supone una función relacionada con la resistencia mecánica (espectrina, filamina A, región tipo inmunoglobulina de la titina, tenascina, fibronectina) tienden a presentar una estabilidad mecánica mayor que la de las proteínas puramente elásticas. Como grupo, las proteínas sin una función mecánica conocida (la calmodulina, el dominio C2A de la sinaptotagmina I, la lisozima del virus bacteriófago T4, la barnasa, la proteína verde fluorescente) tienden a presentar estabilidades mecánicas más bajas. Hay que puntualizar que se trata sólo de tendencias generales, pues entre estos grupos hay amplios solapamientos. Teniendo en cuenta que no se estirará en la célula a todas las proteínas mecánicas necesariamente de la misma forma en que lo hace el MFA y que las proteínas "no mecánicas" no estarían sometidas, en principio, a la acción de fuerzas, bien pudiera ser que la estabilidad mecánica de algunas de las proteínas estudiadas fuese un mero epifenómeno, resultado de someterlas a una fuerza mecánica (o, en el caso de algunas proteínas mecánicas, en una dirección no fisiológica) para la que no han sido seleccionadas evolutivamente.




2. LA FUERZA NECESARIA para desplegar una molécula de proteína depende de la geometría del estiramiento: por una parte influye la topología del punto de rotura (la relación entre la dirección del vector de la fuerza y la orientación de los puentes de hidrógeno), que puede ser en cizalla, como es el caso del módulo I27 de la titina (*a*), o en cremallera, como es el caso del módulo C2A de la sinaptotagmina I (*b*). Por otra parte influye también el punto de aplicación de la fuerza, como ocurre en la molécula de ubicuitina: cuando se la estira desde sus extremos terminales (*c*) resiste mucho más que cuando se tira (*d*) desde el extremo carboxilo terminal y la cadena lateral del aminoácido 48 (*en verde*).

MARIANO CARRION VAZQUEZ

## Cizallas, cremalleras y talones de Aquiles

Estudiemos ahora en detalle la estabilidad mecánica de las estructuras β. La fuerza es una magnitud vectorial. En cuanto tal, no sólo su intensidad, sino también su dirección, sentido y punto de aplicación influyen en la resistencia mecánica que ofrecen las proteínas. Así, las láminas β presentan estabilidades mecánicas distintas en función de la geometría del estiramiento.

En cuanto a la topología del punto de rotura, podemos distinguir dos modelos básicos: cizalla y cremallera. En el modelo de cizalla, la fuerza actúa perpendicularmente a los enlaces por puentes de hidrógeno que mantienen la estructura de la barrera mecánica principal (el punto de rotura) de la proteína; se observa una elevada estabilidad mecánica de la barrera mecánica, pues todos los enlaces resisten en paralelo la acción de la fuerza. Un ejemplo es el módulo I27 de la titina, el muelle biológico del sarcómero muscular (*véase el recuadro* "Un complejo muelle biológico: la titina") que mantiene su estabilidad hasta con fuerzas de 204 pN, a las velocidades experimentales de despliegue habituales con un MFA. En el modelo de la cremallera, la fuerza es paralela a la dirección de los puentes de hidrógeno que mantienen la barrera mecánica, con lo que los enlaces resisten en serie el efecto de la fuerza; los puentes van saltando uno a uno. Acontece así con el módulo C2A de la sinaptotagmina I, que presenta una fuerza de rotura de 70 pN, a las velocidades experimentales habituales con un MFA.

Por otra parte, una misma proteína puede presentar estabilidades mecánicas distintas en función de los puntos de aplicación de la fuerza. La ubicuitina, una proteína muy versátil en sus funciones, presenta una estabilidad mecánica diferente según el punto donde apliquemos la fuerza. Cuando se la estira, como veníamos haciendo hasta ahora, desde sus extremos su resistencia mecánica es de 203 pN,

mientras que lo es de 85 pN si se la estira desde el extremo carboxilo terminal y la cadena lateral del aminoácido 48.

Como veremos en el próximo apartado, en el análisis nanomecánico de proteínas suelen emplearse poliproteínas (repeticiones artificiales, una tras otra, de la proteína a estudiar), truco que permite la identificación sin ambigüedades de moléculas individuales, gracias a que las poliproteínas generan señales periódicas que se identifican con facilidad. Sin embargo, el estiramiento diferencial de la ubicuitina ha podido llevarse a cabo gracias a la existencia de dos tipos de poliproteínas naturales en las que el extremo carboxilo de cada monómero se une al siguiente por el extremo amino terminal (una unión N-C) o el amino libre de la lisina 48 (C-48K). Cuando se simula por computador el estiramiento con el fin de seguir el proceso con resolución atómica, se observa que la región crítica que ofrece la mayor resistencia a la fuerza (la barrera mecánica) es distinta para cada una de estas geometrías de estiramiento y su estabilidad se correlaciona con la medida experimentalmente.

Las poliubicuitinas C-48K sirven para marcar las proteínas que van a ser degradas por la ruta del proteasoma (una nanomáquina encargada de la "trituración " de proteínas, que incluye un primer paso de desplegado del que se piensa que es mecánico), de ordinario en alguna de sus lisinas —la lisina es uno de los veinte aminoácidos estándar— internas. Cabe entonces la posibilidad de que esas lisinas pudieran representar "talones de Aquiles" de la proteína sustrato; la evolución de esta bionanomáquina habría favorecido mecanismos que permiten aplicar la fuerza directamente sobre los puntos más débiles de la estructura de las proteínas sustrato, lo que minimizaría el gasto energético en ATP del proceso.

## ¿Qué más información extraemos?

Para desentrañar los pormenores moleculares del desplegado mecánico de proteínas, los estudios de espectroscopía de fuerza combinan el MFA con la ingeniería de proteínas y la simulación mediante ordenador de la dinámica molecular del proceso, en la que programas informáticos reproducen las interacciones de átomos y moléculas según las leyes conocidas de la física.

En el caso de una proteína o módulo proteico con estructura terciaria y que desempeñe un papel mecánico, el diagrama que representa la extensión de su correspondiente poliproteína en función de la fuerza de resistencia suele tomar la forma de una sucesión de "dientes de sierra", donde cada pico corresponde al desplegado de cada repetición de que consta la poliproteína. Al igual que cualquier otro polímero, y como consecuencia de la segunda ley de la termodinámica, las poliproteínas y las proteínas sin estructura superior (formadas a su vez por aminoácidos) responden al estiramiento como muelles entrópicos: la energía térmica obliga a cada monómero —cada unidad que, repetida, constituye el polímero— a disponerse con el máximo desorden posible (de ahí el calificativo de entrópico). Como resultado global, el polímero se cierra formando un ovillo estadístico, fluctuante. Sin embargo, la fuerza aplicada tiende a alinear la proteína en la dirección en la que se ejerce, con lo que disminuye su entropía; este comportamiento, típico del caucho de las gomas elásticas, se describe matemáticamente mediante la ecuación WLC (del inglés *Worm-Like Chain*, o cadena con forma de gusano). Este tipo de elasticidad contrasta con la dependencia típicamente lineal (conforme a la ley de Hooke) que experimentan nuestros muelles macroscópicos artificiales.

Si continuamos estirando, las proteínas con estructura terciaria podrán desplegarse y ceder todavía mucho más. Las simulaciones permiten predecir con resolución atómica los detalles de este proceso e identificar la existencia de parches construidos con puentes de hidrógeno que, a modo de velcro o de una grapa molecular, mantienen unida la estructura.

Para las proteínas que carecen de estructura terciaria (elastina, regiones PEVK y N2B de la titina), la construcción de poliproteínas híbridas, en las que se incorpora, a modo de marcador interno o "huella digital", repeticiones de un módulo conocido que presente picos de fuerza, posibilita la identificación inequívoca de moléculas individuales. Así pues, a diferencia de otras técnicas estructurales, como la difracción de rayos X o la espectroscopía por resonancia magnética nuclear, la microscopía de fuerza atómica permite analizar no sólo proteínas con estructura terciaria, sino también proteínas desestructuradas.

El desplegado proteico es un proceso estocástico: no ocurre a un determinado valor umbral, ya que el trabajo mecánico realizado por la fuerza se limita en esencia a rebajar la altura de la barrera energética que se opone al proceso, con lo que aumenta la probabilidad de que éste se produzca durante el tiempo que dura el experimento. Es decir, la fuerza mecánica se limita a acelerar una reacción que ocurriría espontáneamente, pero con mucha menor probabilidad.

Observamos, pues, que el MFA (como muchas nanomáquinas biológicas) utiliza un agente (la fuerza) más fisiológico que los agentes desnaturalizantes ordinarios que se usan en bioquímica (urea, cloruro de guanidinio o altas temperaturas) y una coordenada de reacción natural bien definida (la longitud de la molécula, frente a la clásica coordenada de reacción, que vagamente refleja la exposición al solvente).

Entre las propiedades que este método permite analizar destacan, además de la estabilidad mecánica —que no guarda correlación con la estabilidad termodinámica, térmica o química medida por las técnicas bioquímicas clásicas—, la topología mecánica (los puntos de resistencia al estiramiento) y los parámetros cinéticos del proceso, incluida la velocidad con que se produciría la rotura espontánea del plegamiento de la proteína, en ausencia de la fuerza externa.

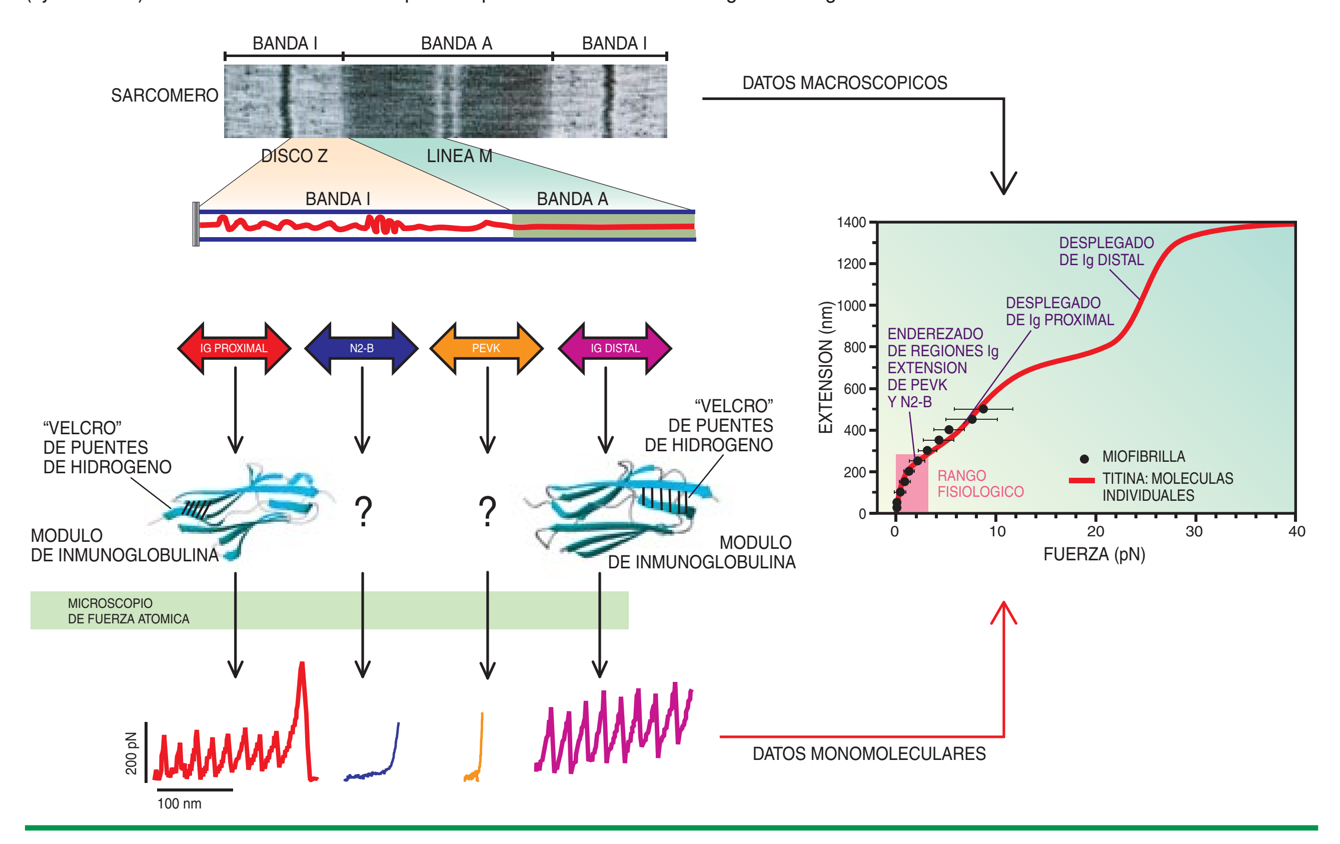
## El muelle del sarcómero

Una de las máquinas biológicas de mayor tamaño y que mejor conocemos es el sarcómero, la unidad contráctil del músculo. Se trata de una especialización del esqueleto celular formada por tres tipos de proteínas, que se organizan en tres filamentos ensamblados a modo de pistón.

El filamento grueso (miosina) es el motor que genera, gracias a la hidrólisis del ATP, el trabajo mecánico de la contracción al desplazarse sobre el filamento fino (actina), que actúa como un raíl rígido. Cada molécula

## Un complejo muelle biológico: la titina

La titina es el amortiguador mecánico de la unidad contráctil del músculo, el sarcómero. Dicha unidad se halla estructurada en bandas de anchura diversa. La titina (*la línea roja ondulada*, que representa una sola molécula) es el polipéptido más largo que se conoce: abarca medio sarcómero, desde el disco Z a la línea M, situados respectivamente en las zonas centrales de las bandas denominadas I y A. Su porción elástica (la banda I) posee dos tipos básicos de componentes mecánicos: unos con estructura terciaria (las regiones proximal y distal de módulos tipo inmunoglobulina, Ig, *en azul*) y otros carentes de estructura definida (las regiones N2B y PEVK). La banda A corresponde a la porción anclada al filamento grueso del sarcómero. Ambos componentes se han analizado con resolución monomolecular mediante el microscopio de fuerza atómica y el método de las poliproteínas, construcciones artificiales de encadenamientos repetitivos de una misma proteína. La elasticidad del sarcómero se había analizado anteriormente *in situ* marcando la titina con anticuerpos en diversos puntos y midiendo la variación de la distancia entre ellos tras la extensión del sarcómero. En la gráfica, los puntos negros representan la extensión (*eje vertical*) en función de la fuerza aplicada por molécula de titina (es decir, se divide la fuerza por el número de moléculas de titina que se estima contiene esta estructura). La curva extensión-fuerza de una molécula de titina (*en rojo*), calculada a partir de la suma de las propiedades mecánicas de cada uno de sus componentes (las gráficas de fuerza-extensión), que se miden gracias a la microscopía de fuerza atómica monomolecular, reproduce bastante bien las propiedades mecánicas del sarcómero. En el rango fisiológico de funcionamiento del sarcómero (*rectángulo rosa*), se estiran los muelles entrópicos reversibles (alimentados por fuerzas térmicas): las regiones de módulos de inmunoglobulina (su estructura global funciona como un muelle entrópico, ya que los módulos se encuentran desorganizadas por las fuerzas térmicas) y las regiones desestructuradas (PEVK y N2B, cuyos aminoácidos constituyentes resultan desorganizados también por las fuerzas térmicas). Por encima del rango fisiológico, tendría lugar el desplegado de algunos módulos de titina "sacrificatorios", con la consiguiente absorción de una gran parte de la energía mecánica del proceso, a fin de proteger el sarcómero de daños irreversibles gracias a que generan a su vez nuevos muelles entrópicos que alargan la longitud efectiva de la molécula.




de miosina genera fuerzas de unos 5 pN. El "tercer filamento" (la titina) constituye un verdadero muelle biológico que mantiene centrado el sarcómero y le proporciona la elasticidad necesaria para que recupere la estructura de reposo tras su actividad ("elasticidad pasiva").

Gran parte de la titina se encuentra anclada al filamento grueso, mientras que su porción elástica está formada por una región de módulos tipo inmunoglobulina con un plegamiento característico y dos regiones (PEVK, N2B) sin estructura terciaria definida, que se intercalan entre los módulos (*véase el recuadro* "Un complejo muelle biológico: la titina").

El estudio de la elasticidad de la región extensible de la titina a partir de la elasticidad de sus distintos componentes, analizados con el MFA, ha permitido la reconstrucción de la elasticidad global de esta región de la proteína mediante un modelo puramente aditivo, es decir, sin más que sumar la elasticidad de cada uno de los componentes. La elasticidad resultante reproduce bastante fielmente la elasticidad del sarcómero medida en las miofibrillas (los paquetes individuales de que constan las fibras musculares), una vez que dividimos

MARIANO CARRION VAZQUEZ

por el número total de moléculas que se estima contiene esta estructura.

Es notable que una propiedad macroscópica, la elasticidad de una estructura tan compleja como el sarcómero de una miofibrilla —integrada por millones de moléculas de varios tipos—, se pueda explicar por la simple suma de las elasticidades individuales de un solo tipo de molécula, la titina, elasticidades individuales que derivan, a su vez, de la suma de las elasticidades de sus diversos componentes. Este resultado descarta por otra parte la posibilidad de que pudieran tener relevancia mecánica en la explicación de la elasticidad del sarcómero interacciones entre moléculas de titina o con otras moléculas del sarcómero.

Uno de esos componentes de la titina, el ya mencionado módulo I27, situado en la región distal, ha devenido un sistema modelo en la nanomecánica de proteínas. Se trata de una proteína globular de la familia de las inmunoglobulinas que presenta una estructura en *sándwich* β, consistente en dos láminas β (que contienen tres y cuatro hebras β) enfrentadas (*véase la figura 2*). La combinación de los estudios mediante microscopía de fuerza atómica, ingeniería de proteínas y simulaciones por computador ha permitido una caracterización completa de los determinantes moleculares de su estabilidad mecánica (*véase la figura 3)*.

Los espectros de fuerzas de una poliproteína de I27 obtenidos mediante microscopía de fuerza atómica muestran una fuerza de rotura para cada módulo de 204 pN, en promedio. Al ajustarlos a la ecuación WLC, los primeros picos del espectro exhiben una desviación (una especie de "joroba").

Las simulaciones ayudan a explicar estas variaciones y permiten la cartografía precisa de las barreras mecánicas de la proteína. El espectro de fuerza de la simulación presenta un primer pico de fuerza, que corresponde a la rotura del parche de puentes de hidrógeno entre las hebras denominadas A y B del módulo I27 y un segundo gran pico a unos 2000 pN que corresponde al parche entre otras dos hebras, las A' y G, seguidos de una meseta de picos que correspondería al desplegado del resto del módulo.

A partir de las simulaciones, podemos interpretar que la "joroba" de los primeros picos de fuerza de los espectros de fuerza medidos por el MFA correspondería a la rotura de todos los parches AB disponibles de la poliproteína; los picos de 204 pN (diez veces menores, eso sí, que los obtenidos en la simulación) corresponderían, cada uno, a la rotura de un parche A'G, principal responsable de la estabilidad mecánica del módulo. Una vez desplegado uno de los módulos, lo que rompería un parche A'G generando un pico de 204 pN, se produciría una relajación de la fuerza, gracias a lo cual podría formarse de nuevo el parche AB de los módulos que no se hubieran desplegado; aparecería así de nuevo una "joroba" en el siguiente pico, pero un poco menor. La distancia entre picos en el espectro de fuerzas del MFA (28,1 nm de promedio, tras ajustar al WLC) corresponde a la longitud de la cadena polipeptídica "oculta" a la fuerza por la barrera A'G y que resulta liberada tras su rotura.

Los parches de puentes de hidrógeno AB y A'G presentan una mayor estabilidad mecánica porque se distribuyen perpendicularmente a la dirección de la fuerza (una conformación en "cizalla"). Tal geometría contrasta con la del resto de los parches de puentes de hidrógeno del I27, que se distribuyen paralelos a la dirección de la fuerza (una conformación en "cremallera"). La información que se obtiene de las simulaciones es, por lo tanto, sólo cualitativa, ya que da unos valores de fuerza un orden de magnitud mayores que los obtenidos experimentalmente.

El modelo descrito concuerda, pues, bastante bien con los resultados experimentales obtenidos aplicando la microscopía de fuerza atómica a poliproteínas del I27 silvestre. Es notable que estas simulaciones (que se realizaron con anterioridad en un laboratorio distinto al que obtuvo los resultados experimentales y sin contacto con éste) concuerden tan bien (eso sí, cualitativamente, pues los valores de fuerza son mucho mayores) con los resultados experimentales. Este modelo se ha verificado mediante poliproteínas mutantes que perturban en unos casos la estabilidad mecánica (medida por la fuerza media de rotura) y en otros la distancia entre picos de fuerza.

## Otras bionanomáquinas mecánicas

Como ya se ha mencionado, los amortiguadores mecánicos, además de estar presentes en el sarcómero, parecen desempeñar también un papel importante en otras maquinarias en las que abundan las proteínas modulares: la maquinaria de adhesión celular (tenascina y fibronectina) y el citoesqueleto cortical (espectrina y filamina A). Se ha propuesto que una de las funciones de estos módulos bien pudiera ser la absorción de las frecuentes tensiones mecánicas presentes en la interfase célula-célula (donde suele abundar el estrés mecánico), contribuyendo de esta forma a alargar tanto el rango de acción como la vida media de las uniones intercelulares.

En cuanto a los motores proteicos (proteínas que convierten energía química en mecánica), además del motor del sarcómero (una máquina de extensión lineal, es decir, que actúa de manera similar al MFA) encontramos muchos otros. Algunos de ellos, las "desplegasas", despliegan otras proteínas como primera etapa de su procesamiento. Un primer sistema, también de extensión lineal, está representado por la chaperonina bacteriana GroEL, una compleja máquina compuesta por diversas proteínas y encargada de corregir las alteraciones estructurales de otras proteínas, que despliega mecánicamente los polipéptidos antes de proceder a su reestructuración. Esta maquinaria ancla la proteína substrato a un par de puntos de su propia estructura y, mediante un cambio de conformación alimentado por la hidrólisis del ATP que aleja los puntos de anclaje, la estira linealmente a modo de un potro de tortura.

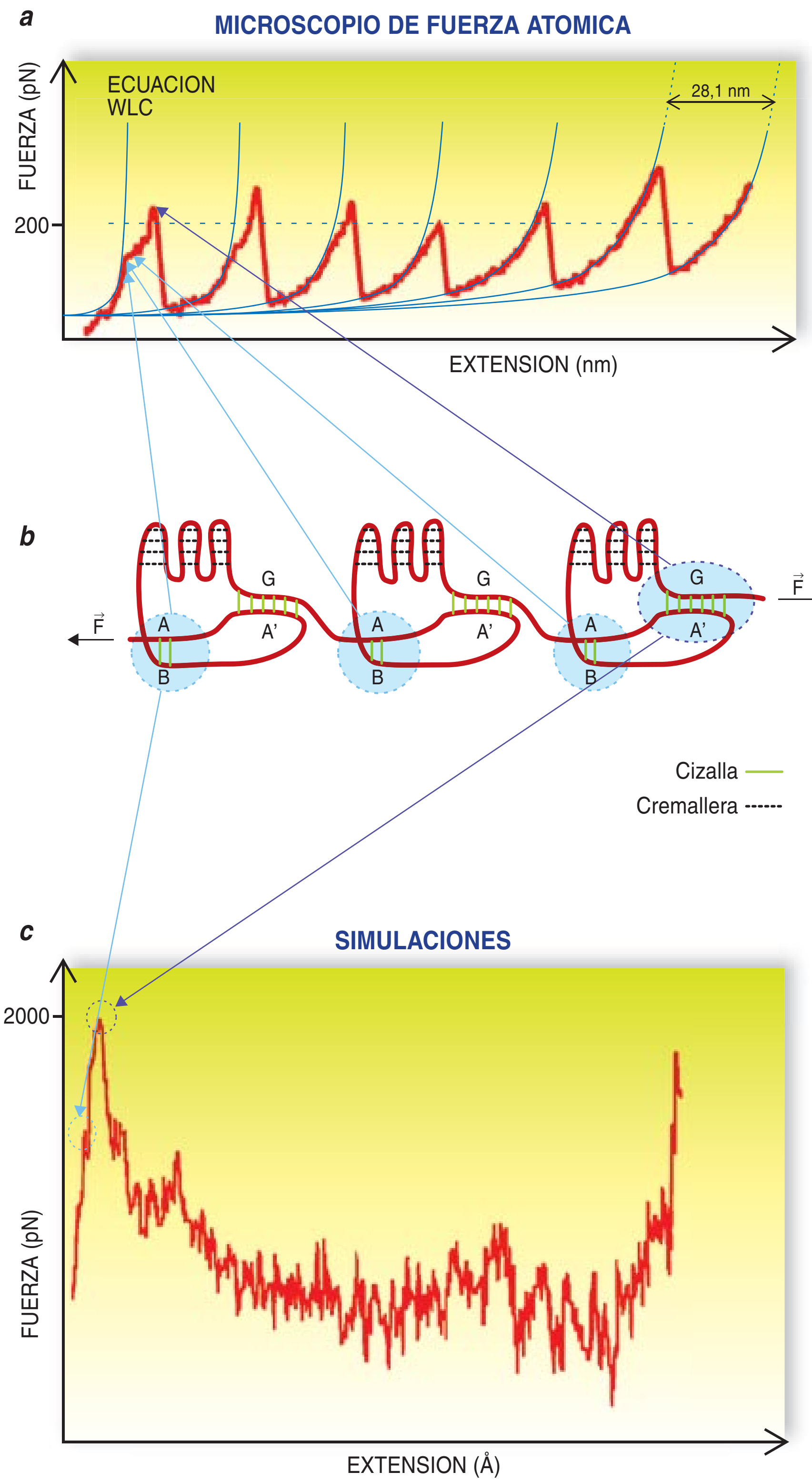
Un segundo sistema está representado por las translocasas y las proteasas compartimentalizadas, máquinas proteicas responsables de los procesos de translocación o tránsito de sus proteínas sustrato a través de la membrana celular (translocasas) o entre dos compartimentos de su estructura (proteasas compartimentalizadas, como el proteasoma). Según el modelo más aceptado, comienzan por desplegar las proteínas sobre las que actúan tirando de ellas por un

extremo. Sólo así logran introducirlas a través del poro que las separa del compartimento de destino, ya que dicho poro es demasiado estrecho para que pase la proteína plegada. Este mecanismo tendría cierta analogía con el trefilado de los metales utilizado en metalurgia para fabricar alambres a partir de cables más gruesos.

Si estas máquinas biológicas —desplegasas como las chaperonas, el proteasoma, y las translocasas mitocondriales y cloroplásticas— que despliegan proteínas como paso previo a su procesamiento lo hacen por medio de fuerzas mecánicas, como se ha propuesto, cabe esperar que la mayoría de las proteínas de la célula acabe, tarde o temprano, sometida a la acción mecánica de estos "potros de tortura" y "cabrestantes" liliputienses. Si esto es así la estabilidad mecánica, tanto de las proteínas como de sus complejos y agregados, sería un parámetro crítico para la fisiología y patología celulares.

Se ha propuesto, no obstante, un mecanismo alternativo al uso de la fuerza mecánica, que aprovecharía las omnipresentes fuerzas térmicas (energía "gratuita" para la célula) para desnaturalizar proteínas en la célula. Hay que matizar, como también se ha propuesto, que las dos explicaciones pudieran ser perfectamente compatibles: podría haber un mecanismo mixto. El mecanismo puramente térmico está basado en la rectificación (filtrado) de las fluctuaciones térmicas mediante los denominados "trinquetes brownianos", dispositivos que convierten el carácter aleatorio del movimiento browniano de las proteínas en procesos direccionales [*véase* "Motores moleculares", por R. Dean Astumian; Investigación y ciencia, septiembre de 2001].

Las maquinarias de empaquetado, desenrollado, replicación, transcrip-




3. CUANDO SE VA ESTIRANDO UN MODULO I27 —un componente proteínico de la titina— con un microscopio de fuerza atómica, la fuerza necesaria para ir desplegando una molécula de poliproteína adopta, en función de la extensión, una forma de dientes de sierra (*a*). Los picos mayores y las pequeñas jorobas antes de cada pico mayor corresponden a la rotura de enlaces internos de la molécula particularmente resistentes al estiramiento, constituidos por parches de puentes de hidrógeno y marcados (*b*) con las letras AB (jorobas) y A'G (picos). Los enlaces paralelos a la fuerza aplicada, o de "cremallera", resisten menos que los perpendiculares a ella, o de "cizalla". Las simulaciones del estiramiento de un solo módulo, que utilizan las coordenadas espaciales de su estructura atómica, reproducen bastante bien, cualitativamente, cada uno de esos picos, aunque no cuantitativamente, pues decuplican, más o menos, el valor de la fuerza (*c*).

ción y traducción del ADN parecen también funcionar de forma mecánica, así como las maquinarias encargadas del transporte de orgánulos intracelulares (el sistema quinesina/tubulina) o la fusión de membranas (el sistema SNARE).

Recientemente se han descubierto también interruptores mecanosensibles de rutas bioquímicas de transducción de señales, que responderían a señales mecánicas que reciben las células mediante la exposición de sitios crípticos de unión a ligandos (por ejemplo sitios de fosforilación/defosforilación por quinasas y fosfatasas) que permitirían activar de esta forma rutas bioquímicas específicas (de crecimiento o morfogénesis, por ejemplo).

La posibilidad de estudiar la mecanoquímica de los componentes de las máquinas proteicas mediante técnicas monomoleculares como la aquí descrita y de reconstruir su función mediante una "ingeniería inversa" (que infiere el diseño a partir del análisis de los componentes de la máquina) nos abre las puertas a la elucidación de los principios fisicoquímicos que gobiernan el diseño de su mecánica de funcionamiento interno y que han sido seleccionados durante eones de evolución. Esta metodología se encuentra aún en su infancia, pero crece rápidamente y con grandes posibilidades de desarrollo. Los principios que revela están también empezando a ser explotados para el diseño de materiales biomiméticos (inspirados en la biología) con aplicaciones potenciales en medicina y en industria. Desde el punto de vista de nuestra salud, hay muchas cosas por explorar, como la posible existencia de "mutaciones mecánicas" y conformaciones o complejos proteicos aberrantes cuya estabilidad mecánica anómala pudiera resultar patológica para el ser humano.

Parafraseando a Richard Feynman, padre de la nanotecnología, podríamos concluir con una invitación a los investigadores que pudieran sentir atracción por este campo emergente: si les interesa la *función*, pasen, al *fondo* hay mucho sitio...

## El autor

**Mariano Carrión Vázquez** estudió bioquímica en la Universidad de Valencia y se doctoró por la Universidad Autónoma de Madrid. Posteriormente se incorporó al equipo del profesor Julio M. Fernández, pionero en nanomecánica de proteínas, en la Clínica Mayo primero y luego en la Universidad de Columbia. Allí introdujo la ingeniería de proteínas en este campo, desarrollando la metodología de las poliproteínas como marcadores monomoleculares. En la actualidad su grupo investiga en la nanomecánica de proteínas del sistema nervioso, en el Instituto Cajal (CSIC).

## Bibliografía complementaria

REVERSIBLE UNFOLDING OF INDIVIDUAL TITIN IMMUNOGLOBULIN DOMAINS BY AFM. M. Rief, M. Gautel, F. Oesterhelt, J. M. Fernández y H. E. Gaub en *Science*, vol. 276, págs. 1109-1112; 1997.

MECHANICAL AND CHEMICAL UNFOLDING OF A SINGLE PROTEIN: A COMPARISON. M. Carrión Vázquez, A. F. Oberhauser, S. B. Fowler, P. E. Marszalek, S. E. Broedel, J. Clarke y J. M. Fernández en *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, vol. 96, págs. 3694-3699; 1999.

REVERSE ENGINEERING OF THE GIANT MUSCLE PROTEIN TITIN. H. Li, W. A. Linke, A. F. Oberhauser, M. Carrión Vázquez, J. G. Kerkvliet, H. Lu, P. E. Marszalek y J. M. Fernández en *Nature*, vol. 418, págs. 998-1002; 2002.

THE MECHANICAL STABILITY OF UBIQUITIN IS LINKAGE DEPENDENT. M. Carrión Vázquez, H. Li, H. Lu, P. E. Marszalek, A. F. Oberhauser y J. M. Fernández en *Nature Structural & Molecular Biology*, vol. 10, págs. 738-743; 2003.

MECHANICAL PROCESSES IN BIOCHEMISTRY. C. Bustamante, Y. R. Chemla, N. R. Forde y D. Izhaky en *Annual Review of Biochemistry*, vol. 73, págs. 705-748; 2004.

PROTEIN NANOMECHANICS AS STUDIED BY AFM SINGLE-MOLECULE FORCE SPECTROSCOPY. M. Carrión Vázquez, A. F. Oberhauser, H. Díez, R. Hervás, J. Oroz, J. Fernández y D. Martínez Martín en *Advanced Techniques in Biophysics*, dirigido por J. L. R. Arrondo y A. Alonso. Springer-Verlag; Berlín, Heidelberg, págs. 163-245; 2006.

# MAMIFEROS DESAPARECIDOS DE SUDAMERICA

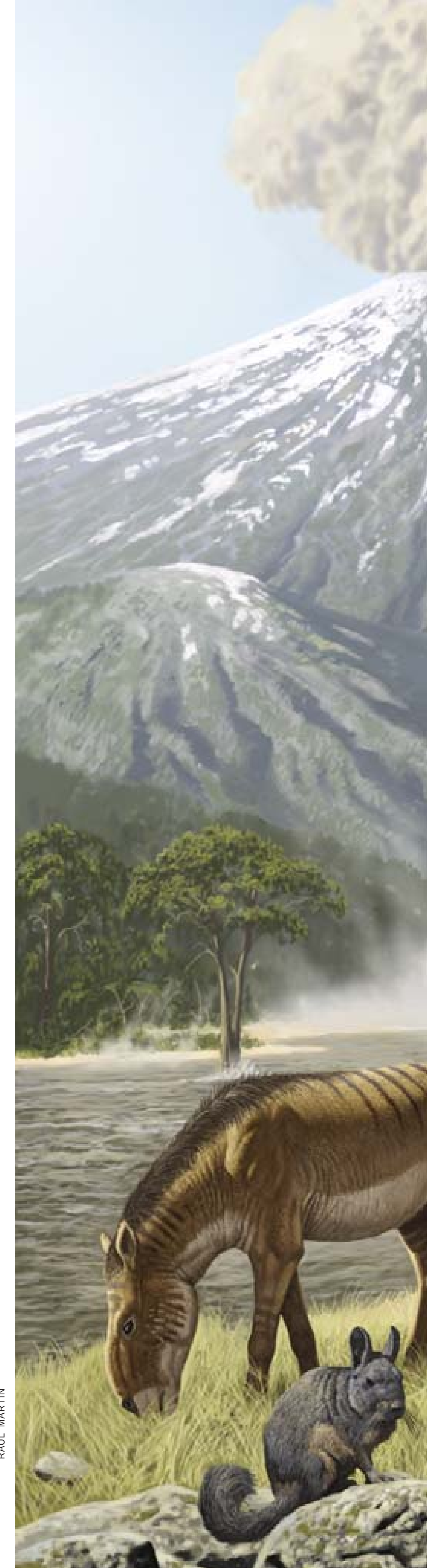
**Los fósiles recién descubiertos en los Andes chilenos nos hablan de mamíferos únicos que antaño vagaban por Sudamérica. Tales hallazgos están cambiando las ideas existentes sobre la historia geológica del continente**

**John J. Flynn, André R. Wyss y Reynaldo Charrier**

En el lindero de una pradera extensa, un par de herbívoros con pezuñas, parecidos a caballos, un notoungulado que recuerda a un antílope y un perezoso terrestre, comen tranquilamente, ajenos a la amenaza que les acecha. Igualmente abstraídos están la chinchilla y un diminuto marsupial con aspecto de ratón que mordisquean semillas en las inmediaciones. De repente, se produce la catástrofe: uno de los volcanes mellados y cubiertos de nieve del horizonte explota. Una avenida de cenizas fangosas se precipita por sus laderas empinadas. Poco después, esa turbia lechada irrumpe en los llanos y sepulta en su curso a los confiados animales.

Para los animales a los que sepultó, ese torrente volcánico resultó devastador. Para la paleontología, en cambio, se convertiría en una bendición. Decenas de millones de años después de la muerte prematura de aquellos mamíferos, las fuerzas exhumadoras de la orogénesis y la erosión subsiguiente pusieron al descubierto restos de sus esqueletos fósiles en los Andes de Chile central. Nuestro equipo los descubrió en 1988, mientras buscaba restos de dinosaurios en un valle alpino del río Tinguiririca, cerca de la frontera con Argentina. El hallazgo resultó ser tan fructífero, que desde entonces hemos vuelto a la región con periodicidad casi anual. Hasta la fecha, hemos exhumado más de 1500 fósiles de mamíferos antiguos, en decenas de enclaves en los Andes centrales de Chile.

El análisis de esta colección paleontológica, que sigue creciendo, ha aportado datos reveladores sobre la historia de los mamíferos antiguos de Sudamérica. Para nuestra sorpresa, los fósiles chilenos tienen entre 40 y 10 millones de años —son mucho más recientes que cualquier fósil cuya presencia presumíamos allí—. De hecho, una cuantía importante de tales especímenes constituyen los únicos restos de mamíferos procedentes de dicho intervalo de tiempo que se han encontrado en Sudamérica.



RAUL MARTIN



1. MAMIFEROS INSOLITOS que antaño poblaron Sudamérica se dedican a sus actividades en esta reconstrucción artística, ajenos a la violenta avalancha de cenizas fangosas lanzadas por un volcán cercano que provocará su inmediata desaparición.

Algunos fósiles arrojan luz sobre un período, hasta ahora obscuro, de la historia de los linajes de mamíferos originarios del continente; otros ayudan a resolver persistentes debates sobre los orígenes de ciertos grupos inmigrantes. En su conjunto, esclarecen la cronología de la aparición de determinados ecosistemas (y la orogénesis) en esta parte del mundo.

## Descubrimiento asombroso

La mayor parte de lo que sabemos acerca de los mamíferos antiguos de Sudamérica se basa en pistas desenterradas en las lejanas regiones australes del continente, sobre todo en la Patagonia. Dichas regiones poseen abundantes afloramientos de rocas fosilíferas: esquistos, areniscas y otros sedimentos endurecidos, procedentes de ríos y de sus llanuras de inundación. Antes de nuestra visita a Chile, no se habían buscado de forma sistemática fósiles de animales terrestres en las áreas montañosas de aquel país, porque allí la mayoría de las rocas son volcánicas. (Se supone que la lava y otros materiales expulsados son demasiado calientes y violentos para la conservación de restos orgánicos.)

Al llegar a nuestras manos un informe sobre huellas de dinosaurios, decidimos probar suerte y ver si el valle de Tinguiririca albergaba fósiles. Las rocas tenían la edad adecuada. (Los geólogos suponían entonces que la mayoría de las rocas del espinazo principal de los Andes chilenos databan al menos de 65 a 100 millones de años de antigüedad, el final de la era Mesozoica, en plena supremacía de los dinosaurios.)

Sabíamos que cualquier sedimento que conservara huellas podía contener restos óseos de los animales que las habían dejado. Si la suerte nos acompañaba y no apartábamos la vista del suelo, podríamos encontrar restos fósiles de los micromamíferos contemporáneos de los dinosaurios, de una tamaño no superior al de las musarañas.

En 1988 emprendimos un viaje de exploración previa de una semana. El último día, nuestro equipo de cuatro se dividió para inspeccionar las laderas empinadas que flanqueaban cada lado del río Tinguiririca. La pareja que trabajaba al norte del río no tardó en alcanzar el estrato de sedimentos antiguos que contenía icnitas, o pisadas de dinosaurios; continuó luego valle arriba en busca de más depósitos fosilíferos. Sin embargo, los únicos fósiles que recolectaron eran de peces, ammonites y otros animales marinos. Ni rastro de reptiles ni mamíferos. Mientras tanto, el equipo que trabajaba en el lado meridional del río corría la misma suerte aciaga. Pero a última hora de la tarde, les visitó la fortuna: divisaron fragmentos de huesos y dientes que la erosión dejaba al descubierto en una gran mancha de sedimentos volcánicos pardo-rojizos, situados a unos 1000 metros sobre el fondo del valle. Un examen minucioso reveló que los fósiles pertenecían a vertebrados terrestres del tamaño de un caballo pequeño.

Según la edad estimada de esas rocas, los fragmentos recuperados debían corresponder a dinosaurios peculiares u otros animales raros del Mesozoico. La complejidad de los dientes hallados, en cambio, nos ofrecía una historia distinta. Esos dientes diferenciados, con los molares multifacetados, de corona alta y cúspi-

25 kilómetros · El Volcán · Río Maipo · Río Cachapoal · CHILE · ARGENTINA · San Fernando · Río Tinguiririca · Termas del Flaco · Río Teno · Tinguiririca · Lago Laja (a 250 kilómetros al sur) · Perú · Brasil · Bolivia · Chile · Argentina · Océano Atlántico · Patagonia

**ROCAS FOSILIFERAS**

Más de una docena de enclaves en los Andes de Chile central, entre ellos los que se indican a la izquierda (*puntos*), han proporcionado en su conjunto cientos de fósiles de mamíferos desde que los autores descubrieron un yacimiento próvido en el valle de Tinguiririca en 1988. De entre 40 y 10 millones de años de antigüedad, esos restos de mamíferos son los primeros que se han encontrado en dicha región; la mayoría de los mamíferos fósiles del continente proceden de la Patagonia, situada más al sur. Los restos se han conservado en sedimentos volcánicos de la Formación Abanico *(marrón)*, que se encuentran al descubierto a lo largo de miles de kilómetros cuadrados de terreno alpino y empinado.

LUCY READING-IKKANDA

## Resumen/*Minas fosilíferas*

- Los más de 1500 especímenes de mamíferos fósiles descubiertos en los Andes de Chile central comprenden un repertorio notable de especies nuevas, así como restos de los roedores más antiguos conocidos del continente.
- Los nuevos fósiles, de 40 a 10 millones de años de antigüedad, llenan lagunas de la historia de los mamíferos raros de Sudamérica.
- Algunos de los fósiles documentan la existencia de una pradera de 32 millones de años de antigüedad, que antecede en unos 15 millones de años a este tipo de ecosistemas en otras partes del mundo.

de plana, correspondían a mamíferos poderosos, demasiado evolucionados para haber vivido con anterioridad a unos 50 millones de años. Parecía que los geólogos se habían desviado en su estimación de la edad de tales rocas.

En efecto, los análisis posteriores confirmaron que los fósiles procedían de avanzada la era Cenozoica, el período actual de la historia de la Tierra, que empezó cuando los dinosaurios no aviares se extinguieron, hace 65 millones de años. (Ahora se sabe que las aves son terópodos, con lo que representan un grupo actual de dinosaurios.)

## Zoológico insular

El descubrimiento de fósiles, fueran del tipo que fueran, constituía ya una sorpresa para nosotros. El hecho de que correspondieran a mamíferos —y, además, inesperadamente recientes— no hacía más que añadir interés al hallazgo. No había duda: centraríamos nuestra siguiente campaña en aquel enclave. Regresamos al valle de Tinguiririca en el verano austral de 1989, después de que las nieves de las altas montañas se hubieran fundido lo suficiente para que las autoridades locales reconstruyeran la angosta carretera de acceso, que en primavera suele ser arrastrada por las aguas. Esa vez alcanzamos el yacimiento fosilífero una mañana clara y soleada de enero. Contábamos con un equipo de siete científicos y todos los pertrechos de expedición. Descargamos los animales, instalamos el campamento cerca de un pequeño riachuelo y empezamos la caza.

Apenas habíamos comenzado a arañar la ladera, aparecieron ante nuestra vista fragmentos magníficos de huesos y dientes. De un nódulo de roca del tamaño de una patata sobresalían los dos extremos de un cráneo que pertenecía inequívocamente a un mamífero; así lo indicaban, entre otras características, un par de mandíbulas inferiores. (Los maxilares de los reptiles constan de numerosos huesos separados.) Posteriormente, describiríamos a ese animal como una nueva especie de notoungulado, un grupo diverso de herbívoros con pezuñas, cuyo tamaño iba desde el de un conejo hasta el de un hipopótamo y que se extinguieron hace menos de un millón de años. Esa nueva especie debió guardar semejanza con un antílope.

Los dientes que habíamos encontrado el año anterior pertenecían a un notoungulado parecido a un rinoceronte. En total, durante nuestras tres primeras campañas de trabajo de campo en Tinguiririca descubrimos más de 300 especímenes: entre ellos, marsupiales, un perezoso primitivo, armadillos y un roedor que recordaba a una chinchilla.

Tardaríanse años en desentrañar el significado de los hallazgos. Lo que no fue óbice para que, desde el comienzo, supiéramos que nos hallábamos ante un descubrimiento de suma importancia. Esos nuevos fósiles tenían mucho que contar sobre la historia de los mamíferos actuales y distintivos de Sudamérica: perezosos, monos, hormigueros y chinchillas, entre otros. Los antepasados de esos animales (entre los que se incluían muchas de las nuevas especies halladas en el valle de Tinguiririca) evolucionaron cuando Sudamérica era un continente insular.

En el transcurso de los últimos 80 millones de años, después de la fragmentación del supercontinente Pangea y su porción austral, Gondwana, los movimientos de las placas tectónicas mantuvieron a Sudamérica separada de otras masas continentales. Ese período de aislamiento promovió la evolución de mamíferos nativos, que se adaptaron de manera singular a las condiciones insulares; aparecieron así animales indígenas extraños, lo mismo que en Australia (el ornitorrinco y el koala), Madagascar (famosa por sus lémures) y otras islas modernas. Entre los predecesores insólitos de los grupos modernos de Sudamérica se cuentan marsupiales saltadores, "pseudogatos" marsupiales de dientes de sable, primos de los

## Reparto de actores

A lo largo de cinco temporadas de exploración del valle de Tinguiririca en Chile central, nuestro equipo descubrió fósiles de 25 especies de mamíferos. Muchos de ellos nuevos para la ciencia, vivieron hace unos 32 millones de años. La fauna de Tinguiririca, con más de 300 especímenes, presenta los roedores sudamericanos más primitivos, entre ellos una especie parecida a una chinchilla antigua que en la actualidad todavía no tiene nombre (*1*). Los fósiles de una nueva especie de animal equiforme, *Eomorphippus* (*2*), y *Santiagorothia chiliensis* (*3*) son los representantes más antiguos de dos subgrupos de notoungulados, herbívoros con pezuñas que se extinguieron en los últimos 20.000 años. La fauna incluye asimismo la mayor diversidad de Sudamérica de arqueohirácidos (notoungulados), entre ellos *Archaeotypotherium tinguiriricaense* (*4*). Exclusivos de Tinguiririca son *Pseudoglyptodon chilensis* (*5*), el pariente más próximo de los perezosos que se conoce, y *Klohnia charrieri* (*6*), el único marsupial de su tipo, parecido a una musaraña.




RAUL MARTIN

## Inmigrantes africanos

Los monos del Nuevo Mundo y los roedores caviomorfos (el grupo que comprende los actuales capibaras, chinchillas y afines) no eran habitantes originales de Sudamérica. Llegaron hace más de 25 millones de años, cuando Sudamérica era una isla. Algunos expertos aducen que los antepasados de esos animales venían de Norteamérica, salvando el estrecho brazo de mar que la separaba de Sudamérica, pero nuevos fósiles descubiertos en Chile central sugieren que ambos grupos guardan un parentesco más estrecho con predecesores africanos. Presumiblemente, los colonos originales viajaron desde Africa a Sudamérica sobre islas de vegetación flotantes o a través de algún otro mecanismo de dispersión raro que quizá nunca lleguemos a descubrir.



**MONO**
***Chilecebus carrascoensis***

ESTE CRANEO DIMINUTO (cinco centímetros de largo y 20 millones de años de antigüedad) pertenece a un mono de escaso tamaño; pesaba un kilogramo o menos y quizá se parecía a un tití moderno *(derecha)*.



**ROEDOR**
***Nueva especie innominada***

FRAGMENTO DE MANDIBULA (dos centímetros de largo) procedente de un roedor de 32 millones de años de antigüedad; se trata de uno de los dos roedores fósiles más antiguos encontrados en Sudamérica. Quizá se parecía a un agutí moderno *(derecha)*.

armadillos equipados con cachiporras caudales gruesas y erizadas de pinchos, roedores del tamaño de osos, perezosos del tamaño de un elefante y perezosos que nadaban en el mar.

El conocimiento de los precursores de los mamíferos actuales de Sudamérica se había forjado a partir de hallazgos fósiles anteriores en la Patagonia y otros lugares, pero la información fundamental sobre una parte extensa de tales antepasados seguía mostrándosenos esquiva. En este contexto, los paleontólogos sabían que los perezosos y los hormigueros aparecieron hace más de 40 millones de años, igual que ocurrió con varios linajes exóticos hoy extinguidos (entre ellos, ciertos marsupiales y notoungulados).

Pero no se habían descubierto fósiles que representaran la transición hacia la segunda fase de la historia de los mamíferos sudamericanos (desde hace unos 40 hasta unos 30 millones de años). Lo más interesante fue, por tanto, advertir que los animales que encontrábamos en Tinguiririca vivieron durante ese período, cuya historia se ignoraba.

Los paleontólogos sospechan que, durante esa intrigante laguna del registro fósil, hubo numerosas estirpes singulares del continente que experimentaron una diversificación explosiva. Y de hecho nuestra colección comprende el registro más antiguo de varios grupos de notoungulados y al menos 25 especies de mamíferos, casi todas ellas nuevas para la ciencia. Asimismo, esa era asistió a la llegada de roedores y primates que no figuraban entre los mamíferos originales de Sudamérica.

### Roedores navegantes

Uno de los descubrimientos más interesantes en Tinguiririca fue un fósil del roedor más antiguo conocido de Sudamérica. El hallazgo arroja luz sobre el origen de los capibaras y las chinchillas actuales. Roedores caviomorfos, esos animales y sus parientes inmediatos constituyen la estirpe más antigua de roedores sudamericanos (son distintos de la estirpe más reciente de las ratas, los ratones y otros animales relacionados que llegaron desde el norte hace unos 3,5 millones de años, cuando el istmo de Panamá volvió a conectar las dos Américas). Los paleontólogos coincidían en que los primeros roedores caviomorfos llegaron en algún momento del extenso período que va desde hace 55 a hace 25 millones de años, cuando Sudamérica era todavía una isla. Unos pocos fósiles caviomorfos más recientes parecían indicar que los precursores llegaron de Africa. Pero numerosos expertos defendían la hipótesis de que los roedores inmigrantes hicieron el viaje más corto desde Norteamérica, a través de una cadena de islas caribeñas.

Para contribuir a zanjar el debate, comparamos la anatomía del animal de Tinguiririca con los restos de roedores encontrados en otras partes del mundo. Lo más revelador fue la forma de los diminutos dientes implantados todavía en la mandíbula inferior (la mandíbula superior y los molares no se han encontrado): indicaba que los molares superiores del animal de Tinguiririca poseían cinco crestas distintivas, característica de los molares superiores de los roedores africanos del mismo período. En cambio, las especies de roedores antiguos de Norteamérica poseían sólo cuatro crestas en sus molares superiores.

De la comparación se infiere que el roedor de Tinguiririca guardaba un parentesco más estrecho con los animales africanos. La ausencia de antepasados caviomorfos en los yacimientos fosilíferos más antiguos de Norteamérica apoya también la teoría de un origen africano.

Presumiblemente, los colonos caviomorfos originales viajaron de Africa a Sudamérica sobre troncos flotantes u otras almadías de vegetación. Así lo afirma la conjetura más verosímil que han propuesto los expertos para explicar de qué

RAUL MARTIN *(ilustraciones)*; JOHN WEINSTEIN *Museo de Historia Natural (cráneo de mono)*; MARLENE DONNELLY *Museo de Historia Natural (mandíbula de roedor)*

manera plantas y animales insólitos se abrieron camino hasta regiones diversas y aisladas geográficamente [*véase* “Reptiles y mamíferos del Mesozoico de Madagascar”, de John J. Flynn y André R. Wyss; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril 2002]. La idea de tan increíble travesía transoceánica puede parecer improbable, pero resulta más plausible hace más de 32 millones de años. Por aquella época, el Atlántico abarcaba una extensión de sólo unos 1400 kilómetros en su punto más estrecho (la mitad de ancho que en la actualidad); las corrientes oceánicas de este a oeste en los trópicos se reforzaban de forma esporádica.

En tales condiciones, el viaje se habría reducido a unas dos semanas. Durante las mismas, los animales pudieron haber entrado en un estado de letargo (inactividad y metabolismo reducido durante períodos de estrés). Además, por aquella época el nivel del mar descendía (debido a la formación de los escudos de hielo en la Antártida y a su alrededor), de modo que una o varias islas volcánicas, ahora sumergidas, pudieron operar a modo de pontones y facilitar la travesía.

## Ecosistemas emergentes

Mediante un método de datación nuevo y de fina precisión, que analiza las trazas de argón atrapado en el interior de los cristales de las rocas fosilíferas, determinamos la antigüedad de los roedores y otros animales de Tinguiririca. Tenían entre 33 y 31,5 millones de años. En aquella época, el planeta sufría una disminución de la temperatura y aumento de la sequedad; así lo indican los escudos de hielo crecientes de la Antártida y otros fenómenos. Nos propusimos investigar sobre la respuesta de los mamíferos de Tinguiririca y su entorno ante dicho cambio climático.

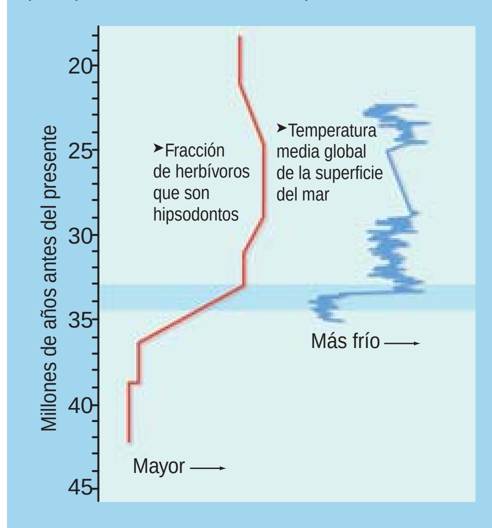
No se han encontrado fósiles vegetales en esas rocas. Pero hemos reconstruido, a partir de pruebas indirectas, el hábitat de los mamíferos de Tinguiririca. Según los primeros análisis de los dientes, estos animales medraron en un ecosistema muy distinto del que conocieron sus antepasados inmediatos. La mayoría de los mamíferos sudamericanos más antiguos, de hace entre 65 y 34 millones de años, eran herbívoros que ramoneaban el follaje de bosque: hojas de árboles y hierbas. (Las plantas fósiles confirman la existencia, durante dicho período, de bosques frondosos, que habrían cubierto una parte extensa del continente.) Los mamíferos que comen alimentos blandos, poseen, humanos incluidos, dientes de corona baja con un delgado remate de esmalte protector que cubre cada diente sólo hasta la línea de las encías.

En marcado contraste, la mayoría de los herbívoros de Tinguiririca poseían dientes de corona alta, con esmalte que se extendía más allá de la línea de las encías, casi hasta el extremo de las raíces. A esa condición se la denomina hipsodontia. El esmalte adicional (más duro que la dentina del interior de los dientes) hace que los dientes hipsodontos sean mucho más resistentes al desgaste que los dientes de corona baja. Es casi seguro que los herbívoros de Tinguiririca desarrollaron por evolución dichos dientes en respuesta a las partículas abrasivas que contenían los alimentos. Lo hicieron las vacas, los antílopes, los caballos y otros animales que comen gramíneas duras en las praderas y sabanas de todo el mundo.

Resulta también significativo que dos tercios de las especies de la fauna de Tinguiririca fueran hipsodontos. La proporción de taxones hipsodontos en relación con otros tipos dentales suele aumentar con la extensión de hábitat abierto; el grado de hipsodontia de Tinguiririca supera el de los propios mamíferos que en la actualidad medran en las llanuras del centro de Norteamérica y otros hábitats abiertos.

## Dientes reveladores

La mayoría de los fósiles de herbívoros de 32 millones de años de antigüedad descubiertos en el valle chileno de Tinguiririca poseen dientes malares de corona alta, o hipsodontos, como los que los ungulados modernos utilizan para triturar plantas fibrosas y duras. Esos molares especializados sugieren que la región de Tinguiririca, su morada, correspondía a una pradera seca. Anteriormente, gran parte de Sudamérica estaba cubierta de bosques; la proporción de especies herbívoras hipsodontas era entonces menor (*línea roja*). El cambio climático global (*línea azul oscuro*) hacia condiciones más frías y, por tanto, más áridas, que tuvo lugar hace unos 34 millones de años (*barra azul claro*), quizás explique por qué se secaron los bosques frondosos.






**CORONAS ALTAS**
La mandíbula inferior derecha, rota, de un herbívoro de Tinguiririca del tamaño del de una oveja muestra los dientes resistentes a la abrasión típicos de los apacentadores de praderas. Las coronas, revestidas de esmalte protector, se extienden más allá de la línea de las encías, hacia el extremo de las raíces; ello proporciona mayor cantidad de material para el desgaste conforme los dientes crecen.



**CORONAS BAJAS**
En la mandíbula inferior derecha de este herbívoro antiguo de Chile (todavía no ha recibido nombre), el esmalte protector cubre sólo la porción de las coronas que se extiende por encima de la línea de las encías. Esos dientes no están adaptados a una dieta de gramíneas silicificadas; pertenecen a animales que ramonean hojas u otro alimento blando.

JOHN J. FLYNN, ANDRE R. WYSS Y REYNALDO CHARRIER (*mandíbula superior*); ALLISON SMITH *Museo Americano de Historia Natural* (*mandíbula inferior*)

De esa gavilla de descubrimientos se infería que los herbívoros de Tinguiririca pastaban en praderas abiertas, no en bosques. Pero los dientes no constituyen el único indicio que apunta hacia esa hipótesis. Darin Croft, entonces alumno nuestro de doctorado y hoy profesor en la Universidad de Case Western Reserve, propuso otras dos explicaciones independientes sobre la precipitación anual y la vegetación que dominaba el antiguo ecosistema de Tinguiririca. Los análisis estadísticos del número de especies con categorías dispares de tamaño corporal y sus atributos ecológicos (análisis del cenograma y del macronicho) revelaron que los animales de Tinguiririca guardaban una semejanza estrechísima con la fauna moderna que medra en praderas secas con retazos de bosque, como las que cubren parte de la sabana africana o los hábitats de *caatinga* y el Chaco, en Sudamérica.

Nuestra interpretación de un hábitat de Tinguiririca abierto, seco y abundante en gramíneas constituyó una sorpresa, habida cuenta de que las pruebas hasta entonces disponibles sugerían que las primeras praderas abiertas de otros continentes no aparecieron hasta hace 18 millones de años. La emergencia postulada de las praderas de Tinguiririca unos 15 millones de años antes habría resultado de la tendencia global hacia la aridez y el enfriamiento por aquella época, tendencia quizás acentuada por el apantallamiento de las lluvias que representaban los Andes, que por aquel entonces se estaban elevando. Las praderas se habrían adaptado mejor a un clima más fresco y seco que los bosques frondosos de los milenios anteriores. Con todo, la hipótesis de que las praderas resultaron del enfriamiento global requiere una investigación pormenorizada, que nos conduzca a una comprobación de una conexión causal directa.



▲ ESTRATOS FOSILIFEROS, empujados hacia arriba y con una inclinación casi vertical, constituyen una prueba espectacular de las fuerzas tectónicas que han venido comprimiendo el Chile central durante millones de años. Estas laderas empinadas se hallan cerca del lago Laja, a unos 300 kilómetros al sur del valle de Tinguiririca.

PHILLIP GANS *Universidad de California, Santa Barbara*

## Solevantamiento tardío

Lo que añade importancia a los mamíferos fósiles de los Andes chilenos es que arrojan luz sobre la historia geológica de este segmento andino. La edad inesperadamente reciente de los mamíferos antiguos echa por tierra hipótesis previas sobre la edad de las rocas que los contienen; indica que esta parte de los Andes se formó al menos 70 millones de años más tarde de lo que se venía declarando. Durante largo tiempo se creyó que la mayoría de las rocas que constituyen el espinazo de la cordillera principal de los Andes centrales de Chile, nominados y descritos por Charles Darwin, se remontaban al menos a 100 millones de años; se creía, asimismo, que las fases iniciales del levantamiento poseían pareja edad. La datación de esos depósitos fosilíferos nos permitió calcular, de forma precisa, cuándo empezó a levantarse esa zona de los Andes: hace entre 15 y 18 millones de años. El solevantamiento continuó de forma episódica hasta el presente. El proceso sigue activo. Las extensas cuencas llenas de sedimentos se formaron durante fases volcánicas de la historia de la cordillera. Ello modeló los ecosistemas antiguos y exclusivos de la región; al propio tiempo, proporcionó un medio de preservación de un registro de mamíferos fósiles espectacular.

## Monos de allende los mares

Tras desenterrar tan valioso tesoro paleontológico y paleoecológico en varias localidades del valle de Tinguiririca, cabía preguntarse si esta región andina constituía una maravilla única. Un obstáculo inesperado habría de conducirnos a la respuesta. En la primavera de 1994, un retraso en la reconstrucción de la carretera que lleva al valle de Tinguiririca impidió nuestra llegada al yacimiento. Lo mejor que podíamos hacer era convertir la frustración en oportunidad. Empezamos a explorar en otra dirección.

Exploramos otros valles principales que presentaban afloramientos de las mismas rocas sedimentarias derivadas de rocas volcánicas, expuestas a lo largo de miles de kilómetros cuadrados de terreno montañoso. Así descubrimos que los mamíferos fósiles no se hallaban restringidos al valle de Tinguiririca. Ni el torrente volcánico que inundó el paisaje antiguo correspondía a un cataclismo aislado y único. Antes bien, tales acontecimientos devastadores tuvieron lugar con cierta frecuencia en un marco temporal de millones de años. En cada ocasión, innumerables capas de material procedente de nuevas erupciones enterraba a mayor profundidad los depósitos más antiguos (y los huesos que contenían). Ese horizonte estratificado de sedimentos (ahora transformados en roca) y lava adquirió una potencia de más de tres kilómetros. Posteriormente, la colisión de las placas tectónicas





2. CRANEOS DE HERBIVOROS en el yacimiento donde se descubrieron. Persistieron encastrados en una matriz de cenizas y fango fósiles, procedente de antiguas erupciones volcánicas. Ambos especímenes corresponden a herbívoros con pezuñas extinguidos, del orden Notoungulados. Los dientes de corona elevada típicos de comedores de gramíneas son notables en el ejemplar de la izquierda. El otro cráneo, que pertenece a un notopitecino, un notoungulado más antiguo y comedor de hojas, se descubrió en fecha reciente cerca del río Teno.

ANDRÉ R. WYSS *(izquierda)*; DARIN CROFT *Universidad de Case Western Reserve (derecha)*

comprimió y aguzó hacia arriba el estrato.

Nuestros análisis de las numerosas faunas, cuya edad va desde los 10 hasta los 40 millones de años, revelan nuevos aspectos de la historia de la región. Uno de nuestros hallazgos más recientes y de mayor importancia (procedente de un yacimiento a unos 100 kilómetros al norte de Tinguiririca, en la cuenca hidrográfica del río Cachapoal) es el cráneo más completo descubierto hasta la fecha de un mono primitivo del Nuevo Mundo. El cráneo, de cinco centímetros de longitud, con ambas órbitas y todos los dientes de la mandíbula superior enteros, pertenece a un mono pequeño que pesaba un kilogramo, a lo sumo. Denominado *Chilecebus carrascoensis*, ese animal guardaba semejanza con los monos modernos del Nuevo Mundo, como los tities y los tamarinos.

Lo mismo que aconteció a propósito de los roedores caviomorfos, los expertos habían debatido durante largo tiempo sobre el origen de los monos del Nuevo Mundo, si Norteamérica o Africa. Pero la anatomía del cráneo y los dientes de *Chilecebus* afirman su origen común con un grupo de primates procedente de Africa. Igual que los roedores caviomorfos, parece que los antepasados de *Chilecebus* atravesaron el Atlántico desde Africa.

Empezando con la fauna de Tinguiririca y culminando con el mono del Nuevo Mundo y otros descubrimientos con que nos vamos encontrando en Chile central, los depósitos volcánicos que antaño se habían pasado por alto han resultado albergar huesos en perfecto estado de conservación. Se trata de uno de los principales archivos de la evolución de los mamíferos de Sudamérica.

Con los años, hemos aprendido a identificar por su aspecto las rocas fosilíferas; en ocasiones las divisamos a kilómetros de distancia. Sin embargo, la recolección de esos fósiles no es tarea fácil, dada la topografía escarpada y la situación remota de muchos puntos de interés. Algunos yacimientos se hallan a pocos kilómetros de carreteras de grava o de pistas de tierra, pero a la mayoría sólo puede accederse a pie, a lomos de caballo o en helicóptero.

Los fósiles del Cenozoico de los Andes chilenos contribuyen a dilucidar la evolución de los mamíferos y las transformaciones ambientales en Sudamérica, un continente cuya larga historia de aislamiento ofrece un espléndido experimento natural para la investigación de los fenómenos evolutivos a gran escala.

## Los autores

**John J. Flynn, André R. Wyss** y **Reynaldo Charrier** han venido explorando en equipo, durante los últimos 20 años, la historia fósil sepultada en los Andes chilenos. Flynn es presidente de la división de Paleontología del Museo de Historia Natural de Nueva York. Wyss enseña geología en la Universidad de California en Santa Bárbara. Lo mismo que Charrier, éste en la Universidad de Santiago. Los autores están en deuda con numerosos expertos preparadores de fósiles, con el Museo Nacional de Historia Natural de Santiago, el Consejo de Monumentos Nacionales de Chile, la Fundación Nacional para la Ciencia de los EE.UU., la NASA y la Comisión Nacional para la Investigación Científica y Tecnológica de Chile por su apoyo a esta investigación.

## Bibliografía complementaria

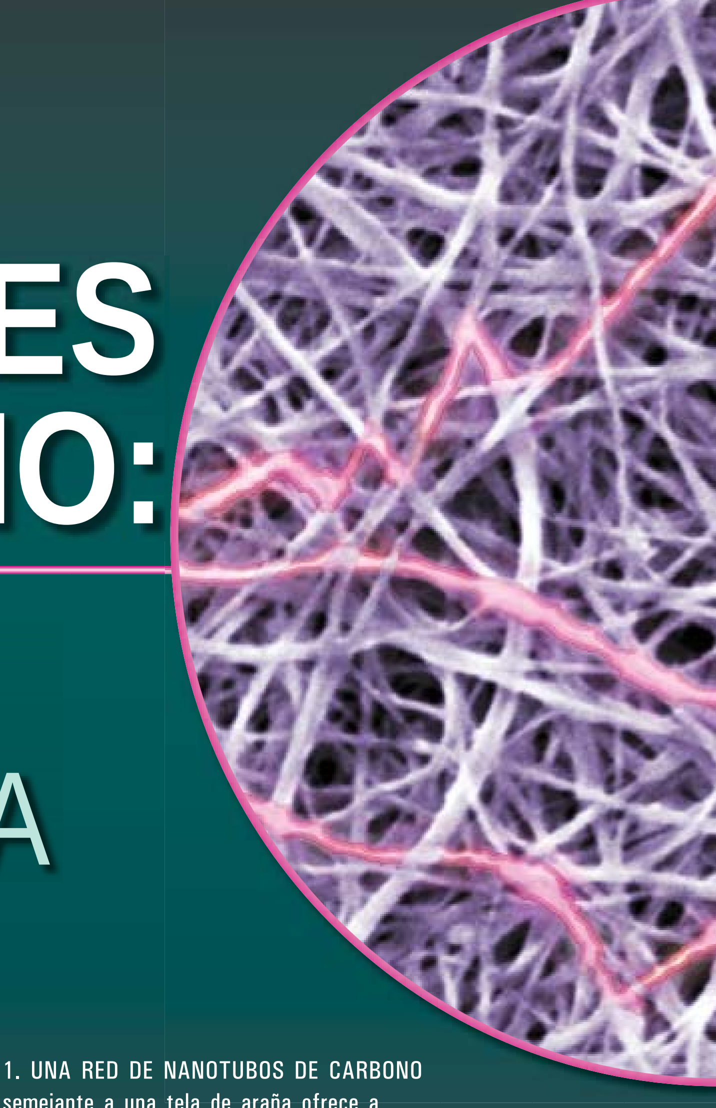

SPLENDID ISOLATION: THE CURIOUS HISTORY OF SOUTH AMERICAN MAMMALS. George Gaylord Simpson. Yale University Press, 1980.

CENOZOIC ENVIRONMENTAL CHANGE IN SOUTH AMERICA AS INDICATED BY MAMMALIAN BODY SIZE DISTRIBUTIONS (CENOGRAMS). Darin A. Croft en *Diversity and Distributions*, vol. 7, n.º 6, págs. 271-287; noviembre, 2001.

THE TINGUIRIRICA FAUNA, CHILE: BIOCHRONOLOGY, PALEOECOLOGY, BIOGEOGRAPHY, AND A NEW EARLIEST OLIGOCENE SOUTH AMERICAN LAND MAMMAL "AGE". J. J. Flynn, A. R. Wyss, D. A. Croft y R. Charrier en *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 195, n.º 3/4, págs. 229-259; 15 de junio, 2003.

# NANORREDES DE CARBONO:

# UNA NUEVA ELECTRONICA



1. UNA RED DE NANOTUBOS DE CARBONO semejante a una tela de araña ofrece a los electrones múltiples vías alternativas (*destacadas en rosa*), lo que asegura que habrá conducción eléctrica. El campo de visión en esta ilustración tiene 0,7 micras de diámetro.

JOHN YORSTON *Carl Zeiss SMT* Y ANDREW PAUL LEONARD *APL Microscopic*; COLOREADO POR JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

Con unas redes aleatorias formadas de tubos de carbono diminutos podrían construirse dispositivos flexibles de bajo coste, como el "papel electrónico" y las células solares impresas

George Gruner

En numerosos relatos de ciencia-ficción la vida extraterrestre se basa en el silicio, materia fundamental de la electrónica moderna, y no en el carbono, fundamento de la biología. Hasta se ha aventurado que la ciencia llegará algún día a crear formas de vida con silicio. Pero no ha sido así. Más bien lo contrario: es el carbono el que empieza a convertirse en material de dispositivos electrónicos y revitaliza la búsqueda de artilugios baratos y flexibles con usos muy dispares.

Estos desarrollos quizá nos sorprendan a quienes en la escuela aprendimos que el carbono, en sus familiares versiones de diamante y grafito, no conduce bien la electricidad. En los últimos 15 años, sin embargo, se han descubierto nuevas formas de carbono: unas estructuras mínimas, de entre unos cientos y un millar de átomos, que permiten el fácil desplazamiento de los electrones. Interesa especialmente el nanotubo de carbono, molécula semejante a una tela metálica enrollada en la que el "alambrado" es una lámina de átomos de carbono 100 millones de veces más pequeña que el alambre de la cerca de un gallinero.

Se ha descubierto que las redes aleatorias de nanotubos de carbono —las "nanorredes"— pueden desempeñar funciones electrónicas esenciales. Mediante una nueva química, nos será dado imitar las propiedades conductoras del cobre o las características, menos conductoras, del silicio semiconductor. Estas innovaciones han allanado el camino para que los nanotubos se responsabilicen de diversas funciones en los dispositivos electrónicos.

Además, no resulta complicado fabricar dispositivos de carbono electrónicos. Se pueden disolver los tubos en un líquido y pulverizar la solución resultante para depositar películas delgadas sobre láminas de plástico flexibles. Se puede

también depositar o imprimir el material sobre otras capas que posean diversas funciones electrónicas; por ejemplo, sobre sustancias que emitan luz al aplicarles una tensión eléctrica.

No hace falta mucha imaginación para percibir que estos métodos simples crearían numerosos productos baratísimos y de manejo sencillo: "papel electrónico" que presentaría información sobre hojas enrollables, como un periódico; sensores químicos; dispositivos electrónicos incorporados en la ropa; células solares impresas sobre las tejas; o sensores de identificación por radiofrecuencia (RFID), construidos en masa para controlar las existencias de productos en almacenes o tiendas.

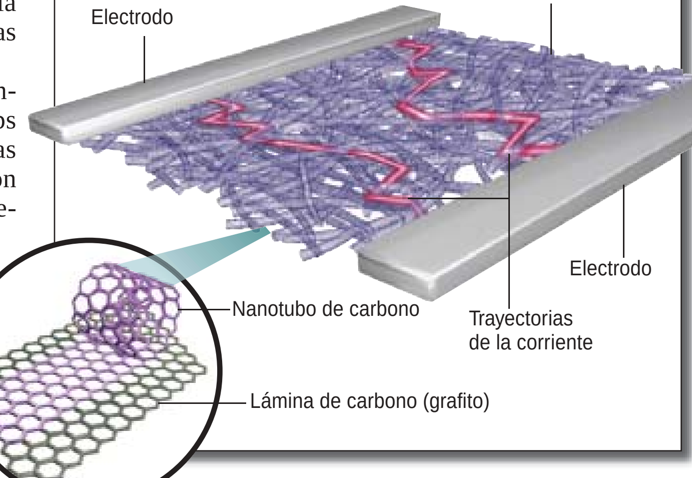
Las aplicaciones de esta índole no requieren la potencia de procesamiento, vertiginosa y cara, de los chips integrados, como los Pentium de Intel o de las pantallas de vídeo de Samsung. Los laboratorios de investigación y desarrollo y las empresas de nueva creación se apresuran a encontrar técnicas que funcionen bien a un coste pequeño.

Aplicaciones tan atractivas exigen demasiado de los materiales electrónicos actuales: tendrían que ser conductores, flexibles, ligeros, transparentes (al menos en algunas aplicaciones, como las células solares y las pantallas) y de bajo coste. Pero casi todos los conductores son metálicos. La mayoría de los metales son opacos, mientras que las películas finas de materiales transparentes, como el diamante, son aislantes (no conducen electricidad). Sin embargo, hay una clase especial de metales que sí deja pasar la luz: los óxidos metálicos. El más conocido, el óxido de indio y estaño, suele utilizarse cuando se necesita ver a través de los electrodos. Acontece, sin embargo, que los óxidos metálicos son caros, pesados y quebradizos; además, su fabricación requiere altas temperaturas de procesado e instalaciones que valen muchos miles de millones de dólares.

Otra opción alternativa nos la ofrecen los polímeros conductores. Aunque los plásticos comunes son aislantes, en los últimos decenios se ha logrado convertir ciertos polímeros en semiconductores e incluso en conductores. En la fabricación de esos plásticos particulares se utilizan técnicas a temperatura ambiente. Ligeros y flexibles, se hallan capacitados para adoptar múltiples formas. Resultan también muy baratos. En su contra, la debilidad de los enlaces que mantienen unidos los átomos en la mayoría de los plásticos. Aquí los enlaces se rompen con cierta facilidad, lo que conduce a la paulatina degradación de muchos de estos polímeros. Pensemos en la utilidad de una célula solar que fallara al cabo de unos cuantos días soleados y cálidos.

## DE LOS NANOTUBOS A LAS NANORREDES

Unas finísimas redes de nanotubos de carbono, las nanorredes, pueden actuar como dispositivos electrónicos. Cada nanotubo es una lámina de grafito, de un solo átomo de espesor, enrollada en un cilindro de alrededor de un nanómetro de diámetro (*detalle*), unas 50.000 veces menos que el grosor de un cabello humano. La corriente eléctrica pasa de un electrodo a otro a través de los tubos interconectados.




JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

## Resumen/*Nanorredes electrónicas*

- Los nanotubos de carbono —minúsculos cilindros de láminas de carbono enrolladas— son buenos conductores eléctricos, aptos para multitud de aplicaciones electrónicas. Pero los productos de fábrica basados en tubos individuales son costosos y adolecen de notables problemas de fiabilidad.
- Se llama nanorredes a las redes aleatorias formadas por gran cantidad de nanotubos de carbono. Realizan a bajo coste numerosas funciones electrónicas básicas. Por su durabilidad, resultan adecuadas para dispositivos portátiles.
- Las nanorredes de carbono deberían, en pocos años, encontrar aplicación para sensores, células solares, papel electrónico y pantallas táctiles y visuales flexibles.

## Un hilo mejor

Pasemos a los nanohilos de carbono conductores. Los nanotubos de carbono saltaron a la palestra hace ya algunos decenios, pero nadie apreció entonces su valor. Después, en 1991, los redescubrió Sumio Ijima, químico japonés de NEC Corporation. Estos tubos de carbono sutiles miden un nanómetro de diámetro (parecido al de una hebra de molécula de ADN). Su conductividad eléctrica es comparable a la del cobre y sobrepasa la de cualquier polímero en varios órdenes de magnitud. Admiten corrientes más de 100 veces mayores que las toleradas por los mejores metales. Los nanotubos de carbono evidencian una resistencia física notable: se doblan con facilidad, no reaccionan con la mayoría de los compuestos químicos y resisten el desgaste del uso cotidiano.

Para fabricar nanotubos se reduce el carbón a los átomos que lo componen por medio del calor de un arco eléctrico o un láser. Se forma así un "penacho" de carbono, al que luego se añaden catalizadores para favorecer la formación de diversos tipos de moléculas de carbono. Este procedimiento, no muy complicado, produce esencialmente hollín: moléculas de carbono en numerosas formas, incluidas las estructuras esféricas llamadas "buckybolas" (C60), además de otros "fullerenos" y nanotubos de carbono. Los fabricantes tienen luego que entresacar laboriosamente de esa mezcla los nanotubos.

La técnica apunta a separar solamente las muestras largas y casi perfectas que presenten una sola capa de “tela metálica”, no múltiples capas concéntricas. Por eso hoy día cuesta bastante obtener nanotubos apropiados, pero los industriales confían en que los costes descenderán de un modo apreciable si la demanda crece en grado suficiente para justificar la fabricación en masa.

Cuando se utiliza un nanotubo solitario para formar un transistor —un conmutador accionado por la tensión eléctrica y elemento esencial de la electrónica moderna [*véase* “Introducción de los nanotubos en el dominio de la electrónica”, por Philip G. Collins y Phaedon Avouris; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2001]—, el dispositivo resultante supera con facilidad las prestaciones de los transistores integrados en los chips de silicio de los ordenadores actuales. Pero no por eso los nanotubos de carbono van a reemplazar al silicio y al cobre en un plazo previsible. Su principal inconveniente radica en la dificultad de fabricación, enojoso problema que aflige en general a la comercialización de la nanotecnia. Construir dispositivos que se basan en un solo nanotubo puede llevar días enteros porque a menudo se han de montar a mano. La variabilidad de sus prestaciones es otro obstáculo: los nanotubos presentan ligeras diferencias en formas y tamaños, lo que repercute en sus características eléctricas.

## Del monofilamento a la red

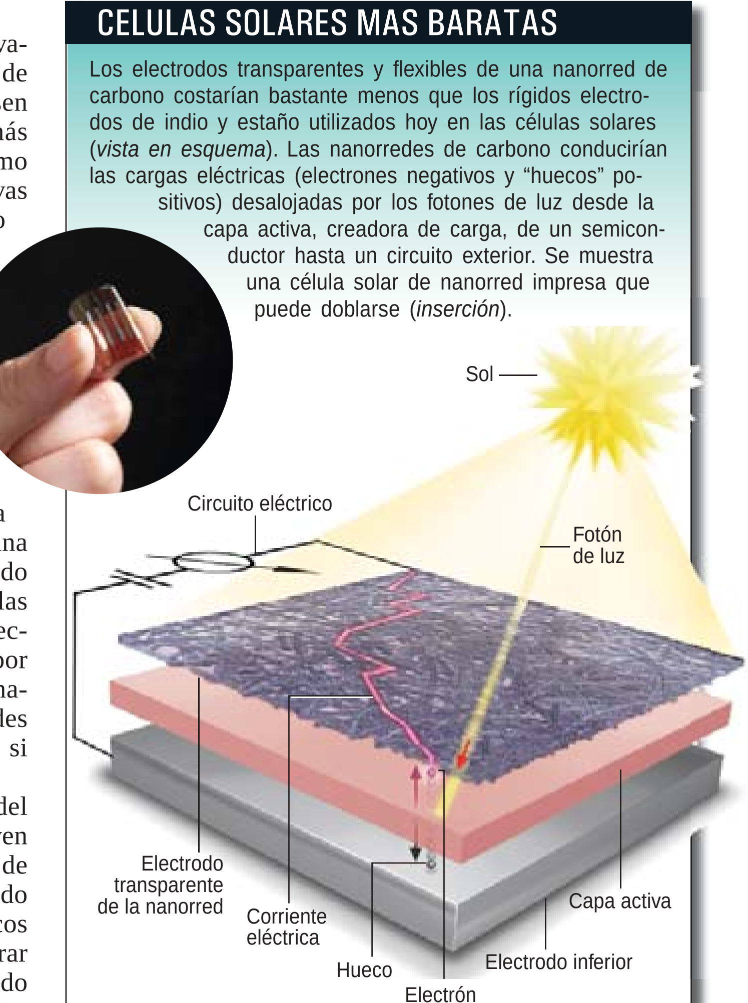
Si bien es cierto que un tubo difiere de otro, tal variación puede promediarse reuniendo muchos tubos, de suerte que las insuficiencias de unos tubos se compensen con los mejores resultados de otros. El modelo más sencillo es una red aleatoria de nanotubos. Del mismo modo que una red de carreteras ofrece vías alternativas cuando una autopista se atasca, un conjunto aleatorio de nanotubos que conduzcan la electricidad —la “nanorred”— puede acelerar la transmisión de electrones al presentar otros caminos. Se estableció muy pronto que estas redes aleatorias casi bidimensionales aportaban, por sí mismas, unas propiedades interesantes.

Ante todo, los numerosos trayectos y conexiones de la nanorred garantizan una buena conductancia eléctrica entre un electrodo y otro, pese a posibles defectos de fabricación. Un buen símil sería el sistema de autopistas que cubre el área metropolitana de Los Angeles. Nadie intentaría atravesarla caminando ni conduciendo por calles con semáforos; se toman las autopistas. Lo mismo vale para la nanorred; los electrones, al saltar de unos tubos a otros, se mueven por un entramado que equivale a una red de autopistas nanométricas. Las múltiples rutas que ofrecen estas redes propician también una notable tolerancia a los fallos: si una ruta se interrumpe hay otras para suplirla.

La nanorred conductora es un sencillo ejemplo del concepto de percolación, que describe cómo se mueven objetos, materiales o corrientes eléctricas a través de un medio aleatorio. Imaginemos que se van arrojando palillos sobre una mesa, uno a uno. Cuando hay pocos palillos, son muy escasas las probabilidades de encontrar un camino continuo que recorra la mesa entera pasando de un palillo a otro. Por debajo de cierta densidad crítica de palillos, las probabilidades caen hasta cero. Pero al crecer el número de palillos se llegará a sobrepasar esa densidad crítica y se producirá la transición a percolación: se formará primero un camino y, luego, cada vez más a través de la mesa. Si aplicamos esta idea a hilos de cobre depositados en una mesa, en cierto momento la red llegará a conducir eléctricamente de lado a lado de la mesa; la corriente dependerá de la densidad de la acumulación de hilos de cobre. Los físicos teóricos se ocuparon de ese concepto tiempo atrás. Mi grupo de la Universidad de California en Los Angeles cartografió una transición semejante en las redes de nanotubos.

Las nanorredes pueden ser, además, muy transparentes. Una ventaja innegable en aplicaciones que requieran la transmisión de luz. Así como el pavimento de una autopista cubre sólo una pequeña fracción del terreno natural, una red de hilos largos y delgados permite el paso de la mayor parte de la luz incidente, muy cerca del 100 por ciento cuando se trata de nanohilos unidimensionales.

Por último, y a la manera de una tela de araña, una red de nanohilos suele ser más resistente que una masa homogénea del material de que está hecha, que al doblarse tendería a romperse. Por estas características, la arquitectura de nanorred se presta muy bien a las aplicaciones en que importa resistir el desgaste cotidiano del uso y




### CELULAS SOLARES MAS BARATAS

Los electrodos transparentes y flexibles de una nanorred de carbono costarían bastante menos que los rígidos electrodos de indio y estaño utilizados hoy en las células solares (*vista en esquema*). Las nanorredes de carbono conducirían las cargas eléctricas (electrones negativos y “huecos” positivos) desalojadas por los fotones de luz desde la capa activa, creadora de carga, de un semiconductor hasta un circuito exterior. Se muestra una célula solar de nanorred impresa que puede doblarse (*inserción*).

JEAN-FRANÇOIS PODEVIN; BRAD SWONETZ *Redux* (*célula solar, Universidad de Stanford*)

del mal uso. (Recuérdense las veces que se nos ha caído el teléfono móvil o el reproductor de MP3.)

## Urdimbre de una nanorred

Por muy prometedoras que sean las ventajosas características de esta técnica para su uso en el mundo real, todo material nuevo forzosamente ha de superar la competencia, en cuanto al funcionamiento y en cuanto al coste, de los materiales actuales que pretende reemplazar. No alcanzaban ese nivel las primeras películas de nanotubos que hace dos años construimos el grupo del físico Siegmar Roth, del Instituto Max Planck para la Investigación del Estado Sólido en Stuttgart, un grupo de la Universidad de Texas en Austin, y mi propio equipo. No era nada sencillo encontrar las rutas de procesamiento óptimas y la manera más conveniente de depositar los tubos en las superficies.

Es evidente que no se pueden fabricar finas películas de nanorredes tirando uno a uno los tubos, como en el ejemplo de los palillos; hay que proceder de otro modo. Cabe disolver los tubos (en agua, alcohol o líquidos orgánicos) y luego pulverizar el fluido resultante sobre una superficie, pero no resulta tan fácil como parece. Al estar mezclados dentro de un líquido, los tubos tienden a agruparse y, para mantenerlos separados, hay que agregar un aditivo químico. Ciertos agentes, los surfactantes (jabones), satisfacen tal objetivo al rodear enteramente los tubos. Pero si los surfactantes permanecen sobre los tubos después de haber sido esparcidos sobre la superficie, impedirán el paso de electrones entre los tubos (cerrarán los accesos a la autopista). Pese a todo, tras innumerables pruebas con multitud de disolventes, surfactantes y tratamientos, se ha llegado a obtener películas delgadas de redes de nanotubos por medios sencillos (a temperatura ambiente).

En este momento, un método ideado por mi equipo y el grupo de Andrew Rinzler, de la Universidad de Florida, crea películas que presentan mínima resistencia eléctrica y, por tanto, la mejor calidad de funcionamiento hasta la fecha de todos los dispositivos de nanorred.

Al investigar la conductividad de los tubos, se descubrió que este material podía dejar pasar la luz, propiedad importante para pantallas y células solares. La primera indicación de la transparencia de las nanorredes de tubos de carbono se produjo en 2001, mientras estudiaba sus características ópticas mi antiguo asociado posdoctoral Leonardo Degiorgi y su grupo del Instituto Politécnico Federal de Zúrich, junto con David Tanner y sus colaboradores de la Universidad de Florida. Para medir con precisión la conductividad de la nanorred fabricaron películas gruesas; su espesor era excesivo para transmitir luz, pero de sus características dedujeron que una película más delgada sería a la vez transparente y buena conductora. Una vez realizada tal determinación, el equipo de Rinzler (en colaboración con Katalin Kamarás y sus colegas del Instituto Central de Física en Budapest) y el del autor efectuaron mediciones directas de la transparencia óptica de una película de nanorred. Hoy ya se fabrican películas a medida, con diferentes niveles de transparencia y conductividad eléctrica sin más que cambiar su grosor.

## Transistores en nanorred

El foco de la investigación se desplazó de las nanorredes de conductores a las de semiconductores, con las que podrían hacerse transistores. Un transistor requiere materiales con grandes variaciones de conductividad en respuesta a incrementos de señal muy pequeños (verbigracia, la alteración de un campo eléctrico).

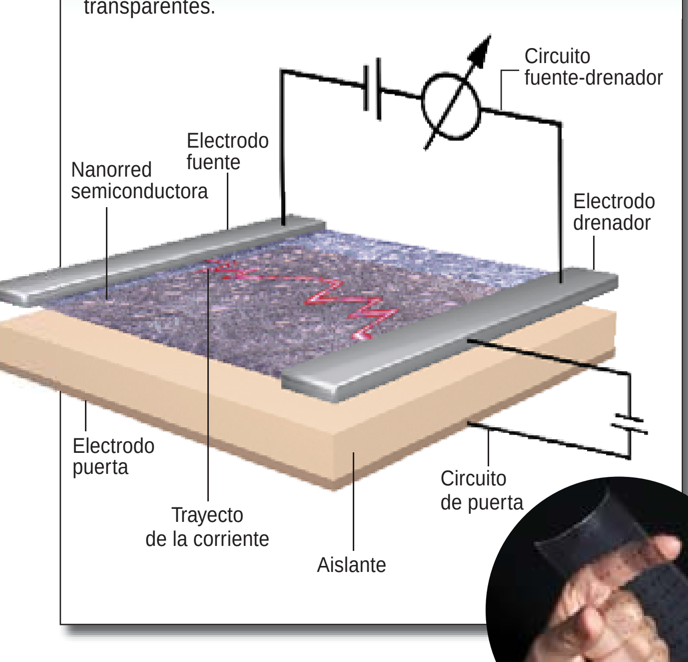
Hace unos siete años surgió la idea de que las redes de nanotubos de carbono pudieran vertebrar transistores de efecto de campo de película delgada. Desde entonces el progreso fue hasta cierto punto rápido: a corto plazo hubo avances en la creación de nanorredes sobre sustratos flexibles, que demostraban la transparencia de los dispositivos. En 2003, produjeron transistores de nanorred tanto mi grupo de investigación y desarrollo de Nanomix (empresa de Emeryville, cuya jefatura científica desempeñé), como un equipo del Laboratorio de Investigación Naval de Washington, D.C., dirigido por el experto en materiales Eric Snow.

Pero los dispositivos en cuestión se formaban sobre sustratos rígidos de vidrio a temperaturas de 900 grados Celsius, demasiado altas para sustratos de plástico flexible que fundían a 120 grados. Los investigadores de Nanomix Keith Bradley y Jean-Christophe Gabriel, en colaboración con mi equipo de la Universidad de Los Angeles, fabricaron en 2003 los primeros transistores de red de nanotubos flexibles sobre plástico.

Poco después, nuestro grupo de Los Angeles colaboró con el de Roth en el Instituto Max Planck

### TRANSISTORES TRANSPARENTES

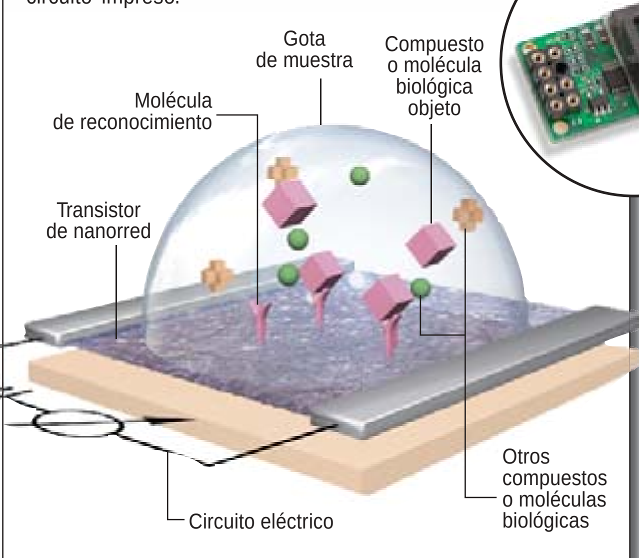
Las películas de nanorredes de carbono, preparadas para comportarse como semiconductores, pueden servir para formar transistores de efecto de campo, elementos básicos de ordenadores, teléfonos celulares y otros dispositivos digitales. En este conmutador (*visto en esquema*), la pequeña tensión eléctrica que suministra el electrodo puerta amplifica la corriente en el circuito fuente-drenador. En la inserción, un técnico dobla una lámina de plástico en la que se ha impreso un sistema de transistores de nanorred transparentes.




JEAN-FRANÇOIS PODEVIN; BRAD SWONETZ *Redux* (*transistor, Unidym*)

## SENSORES DE BAJO COSTE

Una nanorred puede convertirse en un sensor si se le añaden “moléculas de reconocimiento” que reaccionen con determinado compuesto químico o molécula biológica. Cuando la sustancia en cuestión se adhiere a una molécula de reconocimiento, la salida eléctrica del sensor se altera. Tales sensores pueden detectar numerosos compuestos, entre ellos un marcador oncológico en la sangre denominado antígeno específico de la próstata (PSA) y, en breve plazo, microorganismos como la bacteria del carbunco, potencial arma biológica. Un sistema de nanorredes sensoras, con distintas moléculas de reconocimiento cada una, detectarían con muy bajo coste genes específicos o proteínas con aplicaciones clínicas. En la inserción se ilustra un chip detector de nanorred (*negro*) sobre una placa de circuito impreso.




para fabricar dispositivos que también eran transparentes, adecuados para las pantallas portátiles. Sólo unos meses más tarde, John Rogers y sus colegas, de la Universidad de Illinois, lo lograban también.

Aunque estos transistores de efecto de campo trabajaban a velocidades muy altas —el parámetro esencial de tales dispositivos—, carecían de otras propiedades necesarias, como el funcionamiento a baja tensión. Con miras a economizar energía, nos proponíamos que los dispositivos operasen a tensiones inferiores a las que entregan las baterías normales. Hace poco, Rogers y Tobin Marks, de la Universidad del Noroeste, han cumplido este objetivo. Emplearon polímeros especialmente fabricados para aislar las partes conductoras de los dispositivos.

### Nanorredes en acción

Las nanorredes de carbono ofrecen claras ventajas en numerosos productos portátiles. Esto se hace más evidente al compararlas con algunos de los competidores actuales en esas aplicaciones, entre ellos las películas de metales orgánicos o polímeros y algunos semiconductores. Para tales usos, los materiales deben poseer una buena conductancia (para evitar que la corriente aplicada los sobrecaliente y se produzcan fugas de energía) y una elevada transparencia óptica (el que mira una pantalla necesita ver las capas que tiene debajo).

Esta clase de sustancias permitirá desarrollar impresos, plásticos, desechables o macroelectrónicos. Un ejemplo es la célula fotovoltaica. La típica célula solar de silicio monocristalino da un rendimiento excelente —convierte en electricidad hasta el 18 por ciento de la luz que recibe—, pero es voluminosa, pesada y de fabricación costosa. Imagínese, en cambio, una célula solar fina como una hoja de afeitar. Aunque ofrecerá un rendimiento más bajo (sólo del 5 al 6 por ciento), su fabricación resultará menos costosa y podremos producir con ella sistemas de gran superficie. Estas dos características podrían compensar las prestaciones inferiores.

En una célula solar, los rayos solares entrantes desalojan de la capa media del dispositivo los electrones y sus homólogos de carga positiva (“huecos”). Los electrones emigran a un electrodo, establecen una carga eléctrica y regresan a los huecos a través de otro electrodo, completando así el circuito. Varias compañías se dedican a perfeccionar las capas activas (las que crean carga) de una célula mediante el uso de polímeros avanzados y otras sustancias transparentes y flexibles. Junto con el grupo de Michael McGehee, de la Universidad de Stanford, y con Niyazi Serdar Sariciftci, de la de Linz, nuestro equipo de Los Angeles ha producido células solares flexibles, para la demostración de la viabilidad de la idea, con electrodos de nanorred cuya calidad funcional resulta equiparable a la de los electrodos de óxido de indio y estaño.

Se están examinando películas de nanorred que se colocarían en el interior de una pantalla táctil o visualizadora flexible, ligera y de bajo coste. La pantalla táctil, por ejemplo, consta de dos láminas de electrodos con separadores aislantes intercalados. Al tocar con el dedo la lámina superior en algún punto, los electrodos se unen allí y completan un circuito eléctrico específico para esa posición; el circuito está formado por un patrón de capas lisas y delgadas de materiales conductivos, impreso en la lámina inferior. En colaboración con el grupo de Richard Kaner, de la Universidad de California en Los Angeles, mi equipo ha fabricado y ensayado, en fase también de demostración de la viabilidad, dispositivos basados en nanorredes.

Las nanorredes, además, sirven para construir diodos fotoemisores, que podrían compararse con células fotovoltaicas invertidas: crean luz cuando circula corriente eléctrica entre sus electrodos. Junto con el grupo de Marks, de la Universidad del Noroeste, mi equipo ha presentado recientemente como prueba de viabilidad unos diodos fotoemisores, con resultados excelentes (suficientes, por ejemplo, para cumplir los requisitos del uso en televisores); lo mismo ha hecho un grupo de la Universidad de Montreal dirigido por Richard Martel.

Los transistores construidos con nanorredes se aplicarán a la electrónica impresa. Los ensayos indican que las nanorredes de carbono funcionan con mayor lentitud que las de silicio cristalino, materia básica de casi todos los circuitos integrados, pero presentan atractivas ventajas sobre los polímeros en cuanto a conductividad y duración. Aunque las películas de nanotubos no puedan todavía utilizarse en ordenadores portátiles, ni en televisores, son competitivas en otros muchos productos,

JEAN-FRANÇOIS PODEVIN; NANOMIX “SENSATION” (*sensor*)

sobre todo en los que requieren materiales baratos, flexibles, ligeros, que respeten el entorno y toleren malos tratos. Se espera que su primera aplicación sea en las pantallas grandes de matriz activa. Los transistores de tales pantallas deben operar rápidamente para que las imágenes se renueven con presteza.

Por supuesto, los aparatos portátiles que utilicen este tipo de pantallas precisarán fuentes de alimentación, baterías y supercondensadores de bajo coste, ligeros, muy delgados y desechables. Ahí podrían desempeñar un papel importante las nanorredes, no sólo como electrodos, sino también como componentes de superficie grande que capturen carga eléctrica y la almacenen para su posterior entrega.

## Muchos caminos abiertos

La naciente industria de las nanorredes apenas ha empezado a perfeccionar esta técnica incipiente. No cabe duda de que los estudios de viabilidad antes descritos tendrán continuación en prototipos operativos. Y habrá productos basados en estos nuevos dispositivos. La situación actual recuerda la de la industria de los chips de silicio hace cincuenta años. Los nanotubos progresan a paso firme; se está logrando separar los que conducen electricidad con la eficiencia propia de los metales de los que son semiconductores, lo cual mejorará todavía más el comportamiento de los dispositivos.

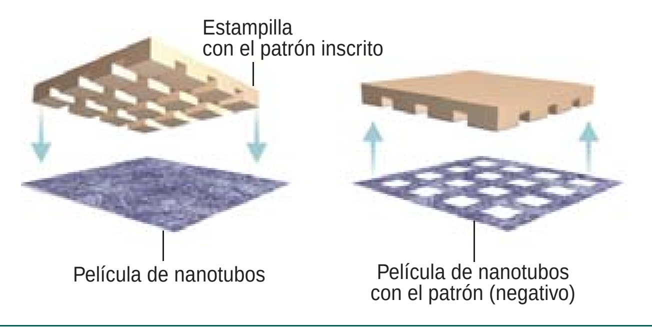
Mientras tanto, se han cosechado ya avances en un proceso semejante al dopado del silicio, en el que se adhieren a los tubos unas moléculas especiales para alterar levemente sus características eléctricas. Muchos observadores creen que es sólo cuestión de tiempo el que tales películas superen la calidad de funcionamiento de los metales tradicionales y se abran camino entre la electrónica digital basada en silicio.

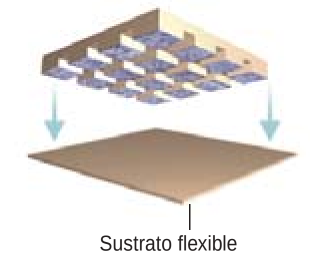
Las nanorredes de carbono acaban de salir del dominio de la ciencia ficción y entrar en el de la realidad tangible. No es probable que esta técnica germinal conduzca a la vida artificial en un próximo futuro, como no lo ha hecho el silicio, pero tiene todas las bazas para conseguir productos innovadores que mejoren nuestra calidad de vida en un horizonte no demasiado lejano.

## IMPRESION DE UNA NANORRED

Los que piensan fabricar productos basados en nanorredes de carbono están desarrollando procedimientos económicos para "imprimir" un patrón, realizado en ese material, sobre la superficie de un polímero flexible, a fin de obtener, por ejemplo, un circuito electrónico. El método más sencillo recuerda al uso de un tampón y una estampilla (*arriba*). Una estampilla que lleva inscrito el patrón entra en contacto con una película de nanorred, de tal modo que partes de esa nanorred se adhieren a las partes sobresalientes de la estampilla; a continuación, se presiona la estampilla sobre la superficie de un sustrato para imprimir en ella el patrón de nanorred. Asimismo se exploran dos técnicas de producción en serie: una es la inyección de tinta normal (*abajo, izquierda*) para pulverizar sobre los sustratos un líquido que contiene nanotubos dispersos; la otra, una variante de la impresión en *offset* que en lugar de tinta utiliza una solución de nanorred (*abajo, derecha*).

### IMPRESION POR ESTAMPILLA

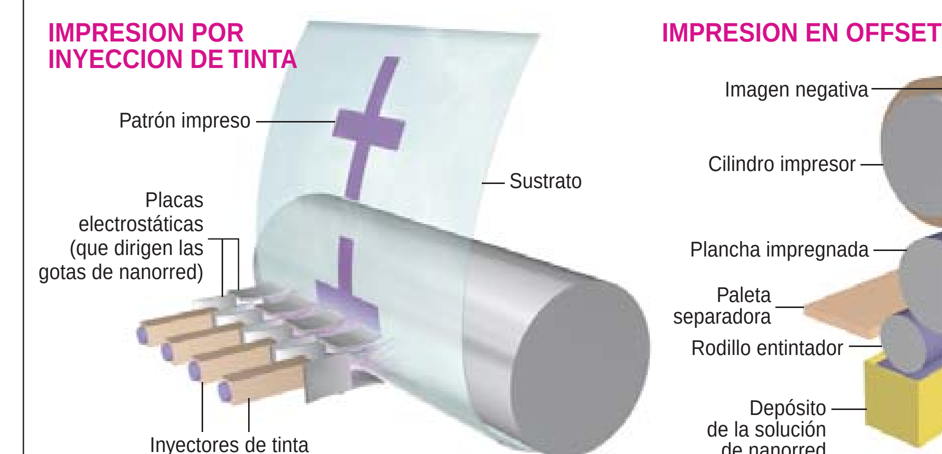


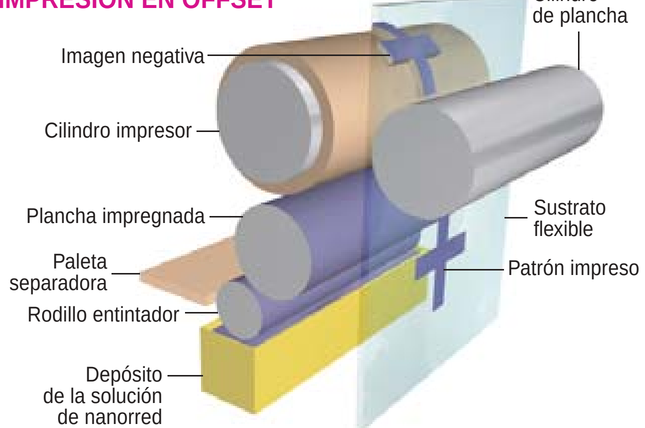




### IMPRESION POR INYECCION DE TINTA




### IMPRESION EN OFFSET




JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

## Nanorredes de carbono: Investigación y desarrollo de productos

Numerosos centros de investigación y desarrollo se hallan produciendo o desarrollando materiales de nanotubos de carbono, películas de nanorred de carbono y dispositivos electrónicos que los incorporan. El desarrollo de una nueva técnica suele pasar por diversas etapas: concepto, I+D, demostración de la viabilidad, prototipo, desarrollo del producto y producción.

| CENTRO | ENFOQUE DEL PRODUCTO | ESTADO |
|---|---|---|
| **MATERIALES DE ALTA CALIDAD PARA ELECTRONICA** | | |
| CarboLex, Lexington, Kentucky. (www.carbolex.com) | Fabricación por arco eléctrico y depositado químico en vapor (CVD) | Producción |
| Carbon Nanotechnologies, Houston (www.cnanotech.com) | Fabricación por CVD y monóxido de carbono | Producción |
| Carbon Solutions, Riverside, California (www.carbonsolution.com) | Fabricación por arco eléctrico | Producción |
| SouthWest NanoTechnologies, Norman, Oklahoma (www.swnano.com) | Nanotubos especialmente producidos por CVD | Producción |
| Thomas Swan, Consett, Reino Unido (www.thomas-swan.co.uk) | Fabricación en gran volumen por CVD | Producción |
| **PELICULAS TRANSPARENTES** | | |
| Battelle Memorial Institute, Columbus, Ohio (www.battelle.org) | Impregnaciones transparentes | I+D |
| Eikos, Franklin, Massachusetts (www.eikos.com) | Tinta conductora | Desarrollo del producto |
| Eastman Kodak, Rochester, Nueva York (www.kodak.com) | Impregnaciones ópticas transparentes | I+D, prototipo |
| Unidym, Menlo Park, California (www.unidym.com) | Películas para pantallas táctiles, células solares, diodos LED | Desarrollo del producto |
| **DISPOSITIVOS** | | |
| DuPont, Wilmington, Delaware (www.dupont.com) | Electrónica transparente | I+D |
| IBM, Armonk, Nueva York (www.ibm.com) | Transistores e interconexiones compatibles con ordenadores | I+D |
| Intel, Santa Clara, California (www.intel.com) | Interconexiones | I+D |
| Motorola, Schaumburg, Illinois (www.motorola.com) | Sensores biológicos y químicos | Prototipo |
| Nanomix, Emeryville, California (www.nano.com) | Sensores químicos y biológicos | Desarrollo del producto, I+D |
| Nantero, Woburn, Massachusetts (www.nantero.com) | Novedosa técnica de memoria | Prototipo |
| Samsung, Seúl (www.samsung.com) | Pantallas | I+D |
| Unidym (*véase más arriba*) | Electrónica impresa para pantallas | Demostración de la viabilidad |

### El autor

**George Gruner**, profesor de física de la Universidad de California en Los Angeles, ha sido científico jefe de Nanomix y fundador de Unidym, empresas nanotécnicas de California.

### Bibliografía complementaria

CARBON NANOTUBES. Mildred Dresselhaus, Gene Dresselhaus, Meter Eklund y Riichiro Saito en *Physics World*, vol. 11, págs. 33-38; enero, 1988.

CARBON NANOTUBES AND RELATED STRUCTURES. Peter J. F. Harris. Cambridge University Press, 2001.

INTRODUCCIÓN DE LOS NANOTUBOS EN EL DOMINIO DE LA ELECTRÓNICA. Philip G. Collins y Phaedon Avouris en *Investigación y Ciencia*, febrero de 2001.

CARBON NANOTUBES-THE ROUTE TOWARD APPLICATIONS. R. H. Baugman, A. A. Zakhidov y W. A. de Heer en *Science*, vol. 297, págs. 787-792, 2 de agosto, 2002.

CARBON NANOTUBE FILMS FOR TRANSPARENT AND PLASTIC ELECTRONICS. George Gruner en *Journal of Materials Chemistry*, vol. 16, n.º 35, págs. 3533-3539; 2006.

CARBON NANOTUBE TRANSISTORS FOR BIOSENSING APPLICATIONS. G. Gruner en *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 384, págs. 322-335; 2006.

# Estado vegetativo

Steven Laureys

Merced a los avances recientes en el servicio de urgencias médicas, crece la tasa de supervivencia tras lesiones cerebrales agudas. Se ha salvado la vida de numerosas víctimas de traumatismos cerebrales (por accidente de circulación en su mayoría) y anoxia (subsecuente a un paro cardíaco o asfixia). Si la lesión reviste suficiente gravedad, el paciente entrará en coma. Los individuos que se hallan en ese estado no abren los ojos; a lo sumo, muestran algunos movimientos reflejos en las extremidades. El coma dura, a lo máximo, entre dos o cinco semanas. Quienes recuperan la conciencia suelen hacerlo al cabo de unos días. Algunos fallecen. Y otros, todavía, despiertan del coma, pero permanecen inconscientes: entran en un estado vegetativo.

El estado vegetativo plantea una situación muy difícil e inquietante, incluso para los expertos. Se produce una clara disociación de los dos componentes principales de la consciencia: el estado de vigilia se mantiene intacto; la conciencia (pensamientos y sentimientos), en cambio, queda abolida.

Los pacientes en estado de vigilia vegetativa muestran ciclos de sueño y despertar. En los momentos en que parecen estar despiertos, abren los ojos; a veces los mueven de forma errática. En otras ocasiones mantienen los ojos cerrados y parecen dormir, aunque puede que los abran y se estremezcan cuando se les habla o se les toca. Esos pacientes suelen respirar de forma autónoma, sin ayuda técnica. A menudo son capaces de realizar movimientos espontáneos: crujir los dientes, tragar, llorar, sonreír, asir la mano a otra persona, gruñir, etcétera. Tales acciones son, sin embargo, de carácter reflejo, no el resultado de un comportamiento voluntario. Los pacientes no fijan la mirada durante un período sostenido en cosa alguna; pero en casos raros pueden seguir brevemente con los ojos un objeto móvil o volverse levemente hacia un sonido fuerte.

JEAN-FRANCOIS PODEVIN

Las técnicas de formación de imágenes del cerebro arrojan luz sobre la pérdida de funciones cognitivas que acompaña al estado vegetativo



EL MUNDO A MEDIAS. Los pacientes en estado vegetativo están despiertos, aunque inconscientes. Abren los ojos y respiran de forma autónoma, pero no obedecen órdenes ni efectúan movimientos voluntarios.

Muchas de las personas que se encuentran en estado vegetativo recobran la consciencia antes de transcurrido un mes desde su lesión cerebral. Cuando no es así, se dice que el paciente se encuentra en estado vegetativo persistente (EVP); la probabilidad de recuperación disminuye con el paso del tiempo. Cada año se producen en EE.UU. unos 14.000 nuevos casos de lesión cerebral aguda que continúan inconscientes un mes después de la lesión. En 1994, el MSTF (de "Multi-Society Task Force"), un equipo multidisciplinar integrado por once investigadores de varias instituciones que se dedican al estudio del estado vegetativo persistente, llegó a la conclusión de que las probabilidades de recuperación eran casi nulas si el paciente no daba señales de consciencia después de un año, en el caso de lesión cerebral por traumatismo, o de seis meses en el caso de anoxia. Para los casos de larga duración, el equipo MSTF propuso la denominación de "estado vegetativo permanente".

El estudio del estado vegetativo persistente atrajo la atención pública en 2005, dentro del debate desencadenado en torno al caso de Terry Schiavo, una mujer de Florida que permanecía en estado vegetativo desde 1990. Los padres y el marido disentían frontalmente sobre la posibilidad de su recuperación; al final, los tribunales autorizaron que le fuera retirada la sonda que la alimentaba. La paciente falleció 13 días después, por deshidratación. Tal controversia situó en primer plano la necesidad de desarrollar medios más eficaces para determinar si un paciente se encuentra en estado vegetativo permanente o si su situación es más esperanzadora.

En fecha reciente se ha estudiado la posibilidad de aplicar las técnicas de formación de imágenes del cerebro a la identificación de signos de conciencia que estarían ocultos en pacientes que no responden. Si los médicos dispusieran de métodos fiables de detección de una conciencia alerta, podrían diferenciar mejor entre las víctimas de lesiones cerebrales que cuentan con posibilidades de recuperación y las que afrontan perspectivas menos halagüeñas. Una investigación así arrojaría luz nueva sobre la naturaleza misma de la consciencia.

## Dificultades diagnósticas

Los primeros signos de consciencia de los pacientes que se recuperan del estado vegetativo son, a menudo, mínimos; la aparición de los mismos, muy gradual. El paciente puede empezar a realizar movimientos lentos, voluntarios, no reflejos, pero seguir incapaz de comunicarse y de expresar pensamientos o sentimientos. Para describir esos casos se ha creado una nueva categoría clínica: el estado de consciencia mínima. Lo mismo que el estado vegetativo, el de consciencia mínima puede ser transitorio, parte del camino hacia una recuperación más completa de la consciencia, aunque también puede cronificarse; en ocasiones, adquiere carácter permanente.

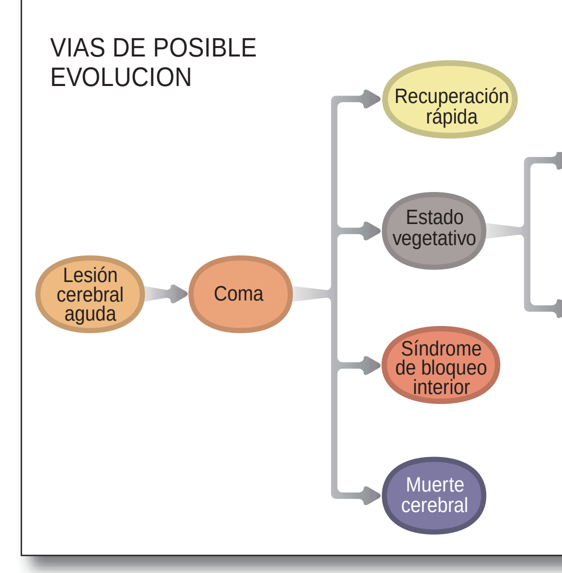
Existe, no obstante, una diferencia importante: los pacientes que han permanecido durante años en estado de consciencia mínima tienen todavía alguna posibilidad de recuperación. Un caso que recibió muchísima difusión fue el de Terry Wallis, quien había permanecido en estado de consciencia mínima desde que sufrió un accidente de circulación en 1984. Wallis recuperó el habla en 2003. Recuperó también cierta capacidad de movimiento de las extremidades, pero no camina y necesita atención continua las 24 horas del día.

La discriminación entre los estados vegetativo y de consciencia mínima no es tarea fácil. Exige repetidos exámenes clínicos por médicos especialistas y experimentados. El diagnóstico de estado vegetativo se funda en la ausencia de signos conductuales propios del estado de consciencia. Con palabras sencillas: si el paciente parece despierto (tiene los ojos abiertos) pero de forma reiterada deja de atender a órdenes ("apriétame la mano" o "mira hacia abajo") y los movimientos que realiza son exclusivamente reflejos, se deduce que su estado es vegetativo.

A comienzos de los años noventa, Nancy Childs, del Centro de Rehabilitación y Asistencia Sanitaria de Austin en Texas, y Keith Andrews, del Real Hospital para la Discapacidad Neurológica de Londres, descubrieron, mediante exámenes minuciosos, que una tercera parte de los pacientes inicialmente diagnosticados en estado vegetativo mostraban signos de consciencia. La

## DESPIERTOS E INCONSCIENTES

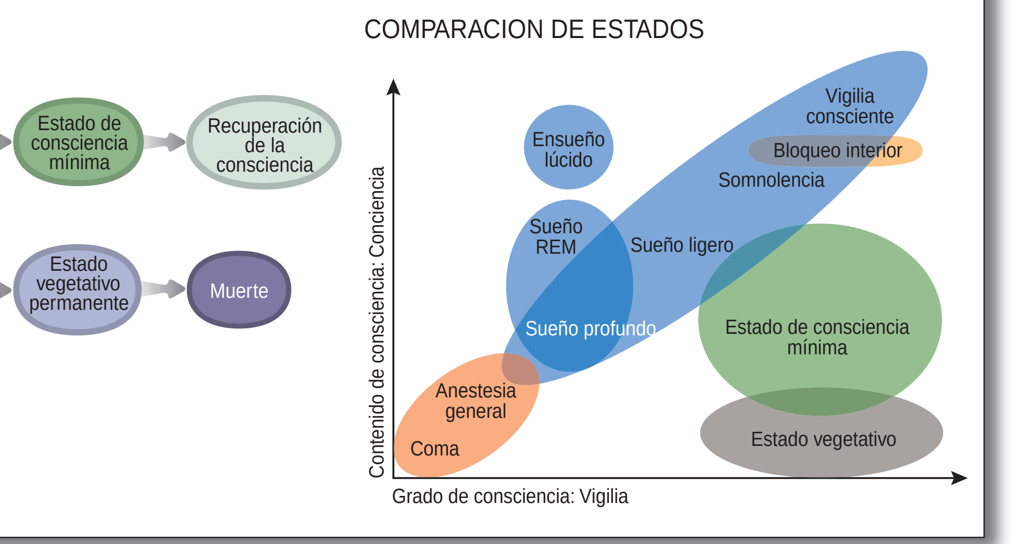
La evolución del paciente que sale de un coma subsecuente a una lesión cerebral puede seguir diversas rutas (*izquierda*). Si no fallece ni se recupera presto, lo más probable es que entre en un estado vegetativo. (En casos excepcionales, el paciente desarrolla un síndrome de bloqueo total, una parálisis completa de la




## Resumen/*El estado vegetativo*

- Sólo en EE.UU., se cuentan por centenares las personas que pasan de un coma al estado vegetativo tras sufrir una lesión cerebral. Los que permanecen en ese estado más de un año tienen una probabilidad casi nula de recuperar la consciencia.
- Se están desarrollando herramientas diagnósticas del estado vegetativo basadas en técnicas de formación de imágenes del cerebro, que permitirían determinar cuáles son los pacientes con probabilidad de recuperación.
- Imágenes funcionales del cerebro han revelado indicios de los mecanismos que subyacen a la consciencia, pero se requiere una investigación más completa para que puedan aplicarse a la diagnosis y a la prognosis.

musculatura voluntaria del cuerpo.) El paciente puede evolucionar entonces hacia el estado de consciencia mínima, desde el que a menudo progresa hacia una recuperación mayor de la consciencia o se persiste en un estado vegetativo permanente. En comparación con personas que se encuentran en otros estados mentales (*derecha*), los pacientes vegetativos presentan un grado de vigilia elevado, a diferencia de los individuos comatosos, que experimentan ciclos de dormición/vigilia; pero no exhiben en absoluto el grado de conciencia característico del estado de vigilia consciente normal.




emisión de un diagnóstico más confiable exige la aplicación de pruebas clínicas normalizadas que valoren las respuestas de un paciente a una amplia variedad de estímulos auditivos, táctiles y visuales. Entre los ejemplos de tales pruebas se cuentan la Escala de Recuperación del Coma, que desarrolló Joseph Giacino, del Instituto Johnson de Rehabilitación de la Fundación JFK, en Edison, y la Técnica de Evaluación de Rehabilitación de Modalidad Sensorial, creada por Helen Gill-Thwaites, del hospital londinense antes mencionado.

La superioridad diagnóstica de esas dos escalas está fuera de duda. Pero su aplicación requiere mucho más tiempo que un examen neurológico rutinario o un test más sencillo, como la Escala de Coma de Glasgow.

Ahora bien, el estado consciente es una experiencia subjetiva. ¿Cómo medirlo de forma objetiva en otro sujeto? Hasta la más cuidadosa estimación podría dejar de lado signos de consciencia en pacientes incapaces de comunicarse, víctimas de lesiones cerebrales agudas. A lo largo de los diez últimos años se han realizado serios esfuerzos para definir un sistema de pruebas objetivas capaces de confirmar o refutar un diagnóstico clínico de estado vegetativo. Las técnicas de obtención de imágenes del cerebro —sea mediante resonancia magnética (RM) o tomografía axial computarizada (TAC)— facilitan la determinación de la extensión de las lesiones cerebrales, pero no aportan información sobre los signos de consciencia.

Pese a todo, la investigación reciente avala la idea de que los exámenes por RM de las lesiones cerebrales traumáticas podrían contribuir a pronosticar si un paciente llegará a salir del estado vegetativo. En efecto, quienes han sufrido lesiones en el tallo cerebral o el cuerpo calloso (la banda de tejido que conecta los dos hemisferios cerebrales) parecen tener magras probabilidades de recuperación.

A su vez, la aplicación de la técnica del tensor de difusión a la obtención de imágenes por resonancia magnética ha arrojado luz sobre los mecanismos subyacentes bajo la recuperación del estado vegetativo. (Mediante esa técnica se estima la integridad de la materia blanca cerebral, los axones neuronales que portan los impulsos nerviosos.) En fecha reciente, un equipo dirigido por Nicholas Schiff, de la Universidad de Cornell, se ha valido de la misma técnica para evidenciar la regeneración de los axones en el cerebro de Wallis, el paciente que recuperó el habla tras 19 años de silencio.

Otra herramienta de uso general es el electroencefalograma (EEG), que mide la actividad eléctrica del cerebro. Los resultados de un EEG revelan el estado de vigilia o dormición de un paciente, porque la actividad eléctrica cerebral se ralentiza durante la dormición sin ensueño. En el caso de pacientes en coma, ese instrumento confirma el diagnóstico clínico de muerte cerebral (cuando el EEG se vuelve isoeléctrico, o "encefalograma plano"). En cambio, el EEG no es de fiar para medir el grado de consciencia. En el caso de pacientes en estado vegetativo, no permite ni confirmar el diagnóstico ni pronosticar las probabilidades de recuperación.

En la Universidad de Lieja, el autor y sus colaboradores han demostrado que pacientes en estado de consciencia mínima exhiben una respuesta eléctrica cerebral, el "potencial P300", cuando oyen su nombre, pero no cuando oyen el nombre de otra persona. Sin embargo, algunos pacientes en estado vegetativo crónico presentaron respuestas P300 similares, por lo que esa técnica no parece ofrecer utilidad diagnóstica.

## ¿Una región consciente?

Las técnicas de obtención de imágenes funcionales del cerebro ofrecen herramientas prometedoras para el estudio del estado vegetativo. Mediante tomografía por emisión de positrones (TEP) se ha demostrado que la actividad metabólica, medida por el consumo de glucosa, disminuye en el estado vegetativo hasta menos de la mitad de los valores normales. Tales experimentos los incoó Fred Plum, de Cornell, hace casi veinte años, siendo confirmados posteriormente por varios grupos europeos, entre ellos el nuestro. Mas, a finales del decenio pasado, descubrimos que algunos pacientes que se recuperaban del estado vegetativo no presentaban cambios sustanciales en el metabolismo cerebral total.

Hallamos, además, que algunos voluntarios sanos y perfectamente conscientes desarrollaban un metabolismo cerebral parejo al observa-

MELISSA THOMAS

do en algunos pacientes en estado vegetativo. Schiff informó, además, que unos pocos pacientes vegetativos presentaban un metabolismo cortical cercano al normal. En consecuencia, la medición del consumo energético total del cerebro no es indicativa de la existencia o ausencia de consciencia.

Sin embargo, nuestro grupo ha identificado en el cerebro áreas que parecen revestir importancia especial para que aflore la consciencia. Tras la comparación de pacientes en estado vegetativo con una extensa cohorte de voluntarios sanos, descubrimos una importante carencia de actividad metabólica en la extensa red de cortezas asociativas polimodales (alojadas en los lóbulos frontal y parietal del cerebro) que intervienen en el procesamiento cognitivo de la información sensorial.

Hemos demostrado que la consciencia guarda relación también con la conectividad funcional ("*crosstalk*") en el seno de esa red frontoparietal y con centros situados a mayor profundidad en el cerebro y, señaladamente, en el tálamo. En nuestros pacientes vegetativos, las conexiones de larga distancia entre unas cortezas y otras, así como los enlaces entre las cortezas y el tálamo, parecían mostrar disrupciones. Además, la recuperación desde el estado vegetativo avanza en paralelo con una restauración funcional de la red frontoparietal y sus conexiones.

Por desdicha, los pacientes en estado de consciencia mínima parecen presentar una disfunción cerebral similar. Por esa razón, la medición por TEP del metabolismo cerebral no distingue entre los estados vegetativo y de consciencia mínima cuando el paciente se encuentra en reposo. En cambio, sí se aplica al análisis de cambios en la función cerebral inducidos por estímulos externos o palabras en voz alta.

Hemos estudiado la percepción del dolor a través de la estimulación eléctrica de la mano (sensación que los individuos de control, sanos, encontraron dolorosa). Mediante TEP, medimos el flujo sanguíneo cerebral, otro marcador de la actividad neuronal. En los pacientes vegetativos y en los sujetos de control, los resultados indicaban actividad en el tallo cerebral, el tálamo y la corteza somatosensoria primaria, que recibe información de los sentidos procedente de los nervios periféricos. En los pacientes vegetativos, en cambio, el resto del cerebro dejaba de responder. La pequeña región cortical que sí exhibía actividad (la corteza somatosensoria primaria) permanecía aislada y desconectada del resto del cerebro, en particular, de las redes que se consideran críticas para la percepción consciente del dolor. (Ello quizá tranquilice a familiares y cuidadores, pues indica que los pacientes vegetativos no perciben el dolor de la misma forma que los individuos sanos.)

Estudiamos también qué ocurría en el cerebro de los pacientes vegetativos cuando les hablábamos. La TEP mostró un patrón similar al de la estimulación somatosensorial: la actividad se limitaba a los centros corticales de más bajo nivel (en este caso, la corteza auditiva primaria), mientras que las áreas polimodales de orden superior dejaban de responder y permanecían funcionalmente desconectadas. Ese nivel de procesamiento cerebral se considera insuficiente para la conciencia auditiva. Sin embargo, en los pacientes en estado de consciencia mínima, los estímulos auditivos inducen una actividad cortical a gran escala y de orden superior, que no suele observarse en el estado vegetativo.

Schiff fue el primero en utilizar la resonancia magnética funcional (RMf) en pacientes en estado de consciencia mínima; demostró que sus redes del lenguaje se activaban al serles narrada una historia que concerniera al paciente y fuera leída por una voz familiar. Cuando la grabación de la misma historia se pasaba hacia atrás, no se suscitaba tal respuesta, mientras que sí lo hacía en individuos de control sanos.

En 2004, descubrimos que los estímulos auditivos provistos de contenidos emotivos (lloros infantiles o el propio nombre del sujeto, por

## OBSERVACION DE LAS LESIONES

Corteza parietal
Tálamo
Corteza prefrontal

En el cerebro de los pacientes vegetativos se aprecian mermas características en actividad metabólica, que se mide por el consumo de glucosa en los tejidos. Las regiones de las cortezas prefrontal y parietal (*púrpura*) son señaladamente menos activas en los pacientes vegetativos. Tal disfunción puede obedecer a una lesión cortical o a un corte de los enlaces (*flechas rojas*) entre las cortezas y el tálamo. Esas conexiones parecen ser esenciales para el estado de conciencia.

ALICE Y. CHEN




## INDICIOS DE RECUPERACION

Apoyados en la aplicación cerebral de la técnica de neuroimaginería funcional, se estudió el caso de una joven de 23 años que había sufrido lesiones cerebrales (*imágenes superiores*). Se observó actividad en un área motora cuando se le pidió que imaginase que estaba jugando al tenis; asimismo, hubo activación de la red de orientación espacial cuando se le pidió que imaginase que se movía por su casa. Se observaron respuestas similares en sujetos de control (*imágenes inferiores*). Ello sugiere que la joven estaba comenzando la transición desde un estado vegetativo hacia un estado de consciencia mínima.

ejemplo) inducen, en pacientes en estado de consciencia mínima, una activación mucho mayor que meros sonidos carentes de significación. Esos resultados indican que el contenido sí importa cuando se le habla a un paciente con consciencia mínima. Mas, para convertir esa técnica en una herramienta de diagnóstico diferencial, teníamos que demostrar que los estímulos auditivos complejos nunca activan redes de gran extensión en los pacientes vegetativos.

## Tenis en el cerebro

La hipótesis anterior se sometió a su más rigurosa prueba en 2006, cuando un equipo de la Universidad de Cambridge, dirigido por Adrian Owen, en colaboración con Melanie Boly, de nuestro grupo, estudió a una mujer de 23 años que había sufrido una lesión frontocerebral traumática en un accidente de circulación. La joven permaneció comatosa durante más de una semana; luego, evolucionó a un estado vegetativo. Abría los ojos de forma espontánea, pero no respondía a ningún tipo de órdenes, fueran o no verbales.

A los cinco meses del accidente, Owen y sus colaboradores estudiaron, mediante RMf el cerebro de la mujer. Durante la exploración, los investigadores reprodujeron grabaciones de frases habladas —por ejemplo, “En su taza había café con leche y azúcar”—, intercaladas con secuencias de sonidos acústicamente concordantes con dichas frases. Las frases pronunciadas suscitaron actividad en los giros temporales superior y medio, regiones comprometidas en la comprensión del habla y del significado de las palabras; idéntico patrón se observó en los sujetos de control. Esos resultados indicaban, posible, pero no necesariamente, un procesamiento lingüístico en la paciente. En estudios con individuos sanos se ha demostrado que tal procesamiento puede ocurrir también durante el sueño e incluso bajo anestesia general.

Para dejar claro si la paciente estaba respondiendo de forma consciente al habla, se llevó a cabo un segundo ensayo, basado en la ejecución de tareas mentales de tipo imaginario. Primero se le pidió a la paciente que imaginase que estaba jugando un partido de tenis; los escáneres de RMf indicaron actividad en el área motora suplementaria del cerebro, exactamente lo mismo que en los sujetos de control. Se le pidió luego que imaginase que recorría las habitaciones de su casa; se activó entonces la red que interviene en la navegación espacial: a saber, las cortezas premotora, parahipocámpica y parietal. Igual que antes, su respuesta era indistinguible de la observada en los individuos sanos. A pesar de que el diagnóstico clínico decía que la paciente se encontraba en estado vegetativo, sí comprendía las tareas y las realizaba repetidamente; debía estar, pues, consciente.

Tan espectaculares resultados planteaban una cuestión: ¿había habido algún error de diagnóstico? Aunque repetidas evaluaciones por expertos habían confirmado que la paciente se encontraba en estado vegetativo en el momento del estudio, los exámenes revelaron que sus ojos se mantenían brevemente fijos en objetos. Cierto es que, si bien se trata de un fenómeno no insólito en el estado vegetativo, resulta atípico y, por tanto, debería inducir a los médicos a buscar otros signos de conciencia. Durante otro examen, transcurridos seis meses desde ese estudio, la paciente logró fijar la mirada sobre un objeto durante un período sostenido (más de cinco segundos) y seguir su propia imagen en un espejo; ambos signos proclaman una transición hacia el estado de consciencia mínima. En la actualidad, la paciente sigue todavía en estado de consciencia mínima; en ocasiones obedece a órdenes, pero sigue sin comunicarse.

Dadas la juventud de la paciente, la causa de su estado vegetativo y la duración del mismo, sabíamos desde el principio que sus probabilidades de recuperación no eran nulas, sino de una parte en cinco. Por tanto, los resultados del estudio no deben ser malinterpretados como prueba de que todos los pacientes en estado vegetativo crónico pueden hallarse conscientes. De hecho, no hemos observado signos similares de consciencia en los más de 60 pacientes vegetativos abordados en la Universidad de Lieja.

De acuerdo con una explicación más verosímil, nuestra paciente de 23 años iniciaba la transición hacia el estado de consciencia mínima cuando se realizó el experimento. De hecho, el grupo que dirige Di

Haibo, de la Universidad de Zhejiang, ha confirmado que la activación de las regiones cerebrales de nivel superior durante las pruebas de RMf constituye un indicio de recuperación en el estado de consciencia mínima.

Los hallazgos reseñados muestran las dificultades que entraña la determinación del grado de consciencia. Es mucho lo que hemos aprendido de las nuevas técnicas de formación de imágenes que miden la actividad neuronal en pacientes con lesiones cerebrales, pero se necesita una investigación más completa antes de que éstas puedan aplicarse a la diagnosis del estado vegetativo y, con ello, contribuir a la prognosis y al tratamiento de este trastorno devastador. Por el momento, los médicos han de seguir fiando en exámenes clínicos concienzudos para tomar sus difíciles decisiones terapéuticas.

## El autor

**Steven Laureys** dirige el grupo de investigación del coma en el Centro de Investigación del Ciclotrón de la Universidad de Lieja. Es director clínico del departamento de neurología del Hospital Universitario Sart Tilman de la misma ciudad. Se doctoró en 2000 en la Universidad de Lieja. Su trabajo está financiado por el Fondo Nacional para la Investigación Científica de Bélgica, la Comisión Europea y la Fundación Mind Science.

## Bibliografía complementaria

THE VEGETATIVE STATE: MEDICAL FACTS, ETHICAL AND LEGAL DILEMMAS. B. Jennett. Cambridge University Press, 2002.

SCIENCE AND SOCIETY: DEATH, UNCONSCIOUSNESS AND THE BRAIN. Steven Laureys en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 6, n.º 11, págs. 899-909; noviembre, 2005.

DETECTING AWARENESS IN THE VEGETATIVE STATE. A. M. Owen, M. R. Coleman, M. Boly, M. H. Davis, S. Laureys y J. D. Pickard en *Science*, vol. 313, pág. 1402; 8 septiembre, 2006.

THE BOUNDARIES OF CONSCIOUSNESS: NEUROBIOLOGY AND NEUROPATHOLOGY. Dirigido por Steven Laureys. *Progress in Brain Research*, vol. 150; Elsevier, 2006.

# MICROORGANISM

**La investigación sobre los microorganismos que medran en medios salinos ahonda en los caracteres unificadores de la vida y los secretos moleculares de la supervivencia en condiciones extremas**

SHILADITYA DASSARMA

Visto desde el aire, el entramado irregular de estanques de evaporación que se extiende al sur de la bahía de San Francisco en California parece un caleidoscopio de rojos y púrpuras. Esos colores se deben a la presencia de organismos unicelulares, extraños microorganismos que medran en soluciones salinas concentradas. Tales condiciones extremas matan a cualquier forma de vida del planeta, salvo a las arqueas halófilas. Estas pertenecen a un antiguo reino que ya existía antes de que la Tierra tuviera una atmósfera aeróbica. Un gran número de arqueas se desarrollan en condiciones extremas (temperatura de ebullición, radiaciones letales, desecación casi absoluta); de ahí que se las denomine "extremófilas".

Nuestro concepto, humano, de la vida se halla condicionado por la biosfera "visible": ambientes terrestres templados y acuáticos marinos o de agua dulce. Pero el repertorio de formas de vida microscópicas que alberga una sola gota de salmuera desafía esa noción. A diferencia de los extremófilos adaptados a una sola condición extrema, las haloarqueas disfrutan de un metabolismo versátil. Crecen en aerobiosis (con oxígeno), anaerobiosis (en ausencia de oxígeno) o como fototrofos (mediante energía luminosa); se adaptan a fluctuaciones de temperatura, *p*H y concentración de iones metálicos. Se las encuentra en marismas anaeróbicas, fuentes hidrotermales, permafrost antártico, salmueras subterráneas o en el subsuelo marino.

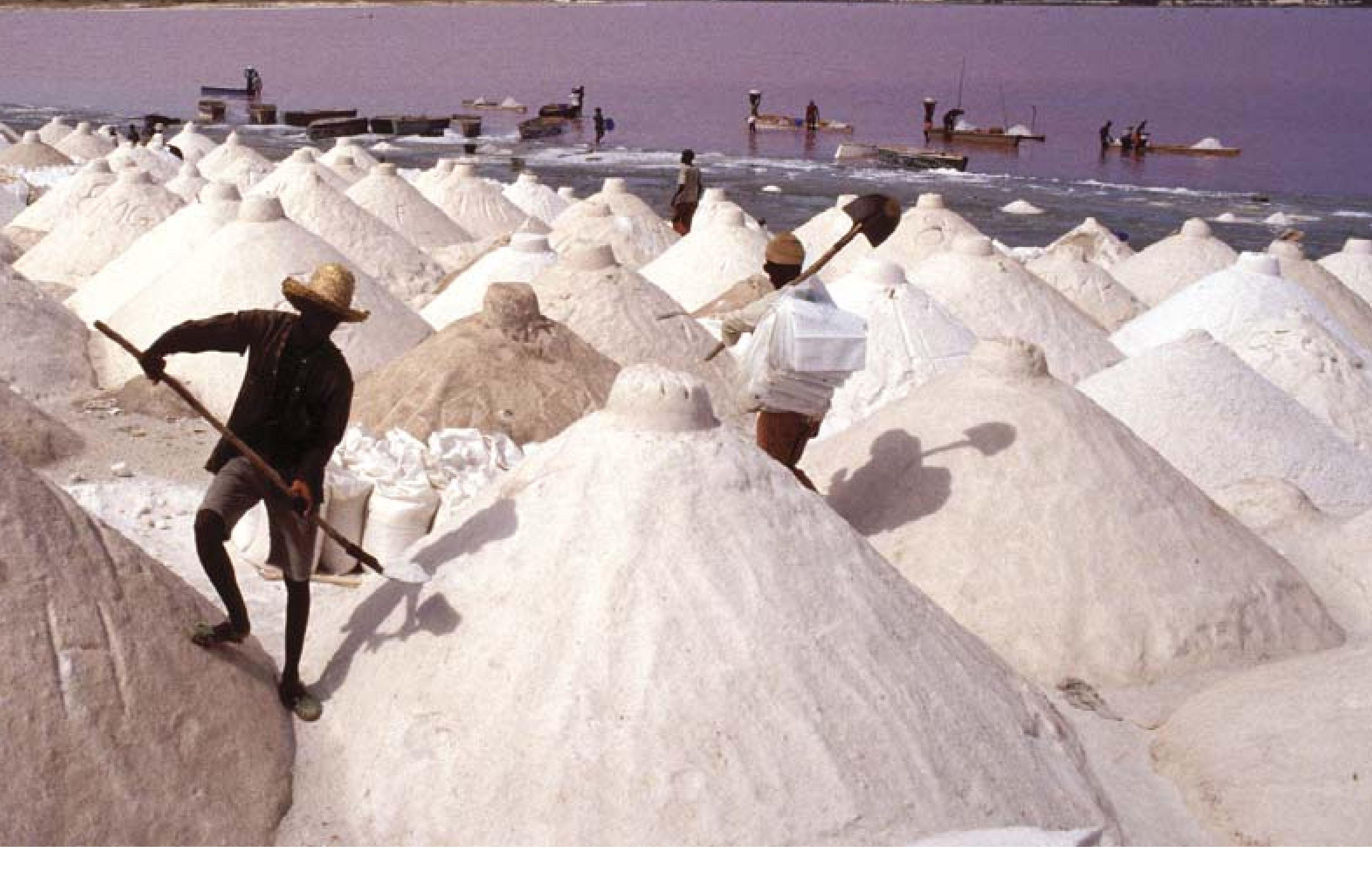
La principal dificultad técnica que entraña el estudio de la mayoría de las especies de arqueas estriba en la recreación, en el laboratorio, de las condiciones extremas que requieren. Las arqueas halófilas, en cambio, son fáciles de cultivar; los microbiólogos las han utilizado en experimentos de genética, fisiología y biología molecular. Las haloarqueas crecen mejor en condiciones de hipersalinidad: desde un poco mayor que la del agua de mar hasta la de salmuera casi saturada. Esos atributos, asociados a los datos genómicos disponibles y a técnicas de manipulación molecular, las han elevado al estatuto de organismos "modelo" para el estudio de otros extremófilos (otras arqueas incluidas) y organismos superiores.

## Diversidad y unidad

Hasta los años setenta del siglo pasado, los expertos creían que todos los procariotas (microorganismos unicelulares sin núcleo) eran "bacterias". El trabajo pionero de Carl Woese y sus colaboradores, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, demostró que no era así. En la actualidad, los procariotas se dividen en dos grupos: las bacterias "genuinas" y esas reliquias evolutivas que llamamos arqueas. Aunque ambos presentan el mismo aspecto al microscopio, las arqueas guardan mayor semejanza, a escala molecular, con los organismos dotados de núcleo diferenciado o eucariotas (levaduras, plantas y animales). Ello demuestra que las arqueas difieren de las bacterias en un plano fundamental.

Pese a tal disparidad crucial, el estudio de las haloarqueas ha arrojado luz sobre formas de vida microbiana y pluricelular. La investigación sobre haloarqueas disponible ayudó a H. Gobind Khorana (con quien empecé mi trabajo en este dominio) a establecer el código genético: la piedra Rosetta de la biología, que permite descifrar los planos de construcción de las proteínas a partir de la infor-

# OS HALOFILOS



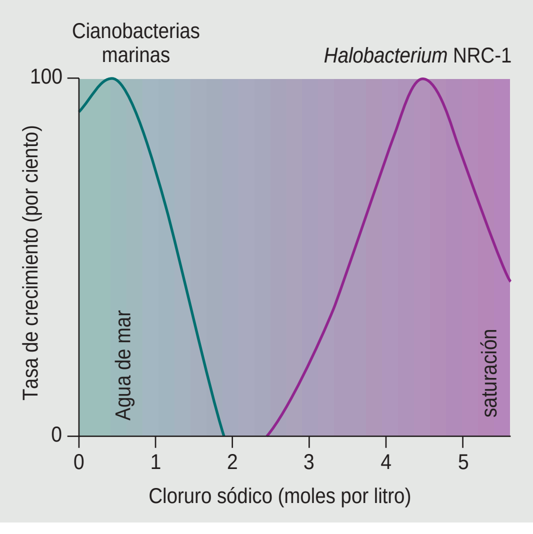
1. EN LAS SALINAS se evapora la salmuera para la obtención de los minerales disueltos. Los estanques de evaporación, como éstos del lago Rosa (Senegal), toman tonalidades fantasmagóricas. Los colores (naranjas, rojos, rosas y púrpuras) se deben a microorganismos halófilos, que medran en condiciones extremas. Como resultado de una historia evolutiva llena de intercambios génicos con otros microorganismos, las haloarqueas toleran no sólo salinidades elevadas, sino también valores extremos de temperatura, *p*H y radiación solar. Esas peculiaridades las convierten en candidatas para llevar a cabo viajes interplanetarios, encerradas en cápsulas salinas del interior de meteoritos.

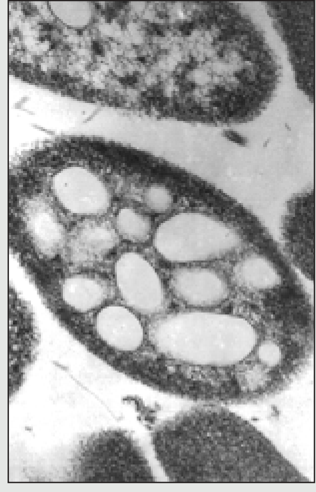
RON GILING/PETER ARNOLD, INC./*American Scientist*

mación que portan los genes. Ese código universal constituye una de las pruebas más sólidas de la unidad de la biosfera.

Otro descubrimiento de primera hora realizado en las haloarqueas fue la bacteriorrodopsina. Se trata de una proteína, identificada por Walther Stoeckenius, que utiliza fotones de la luz solar para bombear iones de hidrógeno (protones) fuera de la célula; el proceso causa la polarización de la membrana celular. Otro complejo proteico aprovecha el flujo de protones que intentan volver al interior de la célula para obtener energía, a la manera en que un molino hidráulico aprovecha la corriente del río para generar un trabajo útil.

En las arqueas, las bacteriorrodopsinas púrpuras se agrupan en una región especializada de la superficie celular, la membrana púrpura; allí facilitan el aprovechamiento de la energía luminosa, lo que permite el desarrollo en condiciones anóxicas. En sus experimentos, hoy clásicos, Stoeckenius y otros demostraron que la luz impulsaba la síntesis de trifosfato de adenosina o ATP (la moneda de las transacciones energéticas celulares), en esferas reconstituidas que contenían bacteriorrodopsina y ATP sintetasa. Esa última constituye la enzima de las mitocondrias, los orgánulos generadores de energía



2. EL AGUA DE MAR contiene unos 30 gramos de cloruro sódico (0,5 moles) por litro (*izquierda*). En ese medio medran las cianobacterias o algas verde-azuladas. *Halobacterium* NRC-1, en cambio, prefiere soluciones 8 veces más salinas, una concentración próxima al punto de saturación (punto en que la sal empieza a precipitar). Vesículas de gas confieren flotabilidad a las células de NRC-1 para mantener su acceso a la luz solar (*derecha*, microscopía electrónica de transmisión).

presentes en las células eucarióticas. El trabajo ofreció una prueba irrefutable de la *asociación quimiosmótica*, el mecanismo de generación de energía que utilizan todos los seres vivos.

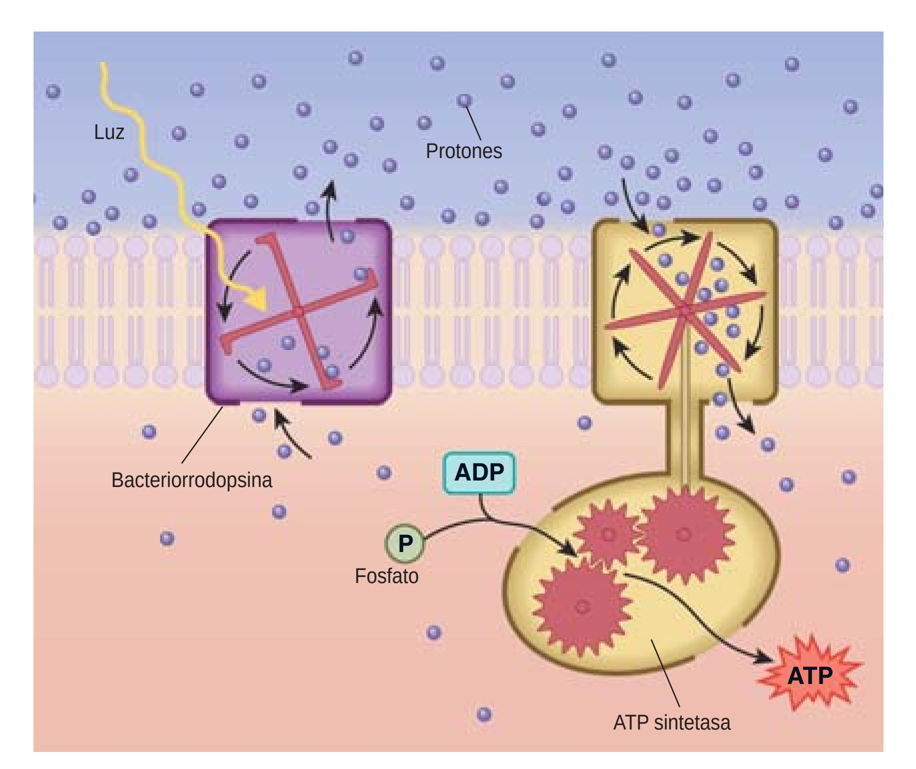
## Genómica extrema

*Halobacterium* NRC-1 fue la primera haloarquea —y una de las primeras arqueas de cualquier tipo— cuyo genoma se estudió. De los ensayos pioneros nos ocupamos W. Ford Doolittle, de la Universidad de Dalhousie, y mi grupo de investigación (entonces en la Universidad de Massachusetts en Amherst). NRC-1 corresponde a una haloarquea típica. Se halla ampliamente distribuida en el Great Salt Lake y otros ambientes hipersalinos. Su genoma se caracteriza por su inestabilidad espontánea, de suerte que mutan los sistemas fisiológicos enteros, verbigracia, la membrana púrpura fototrófica y las vesículas de gas que le confieren flotabilidad.

Semejante peculiaridad nos llevó a la identificación de un múltiples elementos génicos móviles, parecidos a los transposones descritos en el maíz por Barbara McClintock. Fueros los primeros elementos que se descubrieron en las arqueas. Hallamos también que NRC-1 contaba con un par de moléculas de ADN de menor tamaño cabe su cromosoma.

La secuencia del genoma de NRC-1 terminó el verano de 2000. Fue el primer genoma secuenciado en su totalidad con fondos de la estadounidense Fundación Nacional para la Ciencia (NSF). El genoma consta de un cromosoma circular extenso (2014 kilobases) y dos anillos chicos de ADN, los plásmidos, o replicones, pNRC100 (191 kilobases) y pNRC200 (365 kilobases). Los replicones pNRC contienen numerosas repeticiones de ADN responsables de las reordenaciones genómicas: 69 de los 91 elementos móviles, de 33 a 39 kilobases de las repeticiones invertidas (que intercambian o invierten las posiciones en los círculos) y 145 kilobases de secuencia idéntica en ambos plásmidos.

Todas esas repeticiones desconcertaban a los programas informáticos encargados de ordenar en un genoma sin fisura los fragmentos génicos superpuestos. Para resolver el problema aplicamos el conocimiento que en los años ochenta y noventa habíamos adquirido sobre la estructura de pNRC100, conocimiento obtenido merced a una técnica basada en el corte del genoma en lugares especí-




3. LA BACTERIORRODOPSINA, con su coloración púrpura, utiliza la energía lumínica para la obtención de combustible celular. Los fotones de luz producen cambios en la forma de esa proteína mediante el bombeo de protones (iones de hidrógeno) hacia fuera de la célula. Otra proteína, la ATP sintetasa, aprovecha el flujo de protones que tiende a volver al interior para convertir el difosfato de adenosina (ADP) en trifosfato de adenosina (ATP). A su vez, el ATP aporta la energía para que otras máquinas moleculares realicen un trabajo útil.

BARBARA AULICINO (*gráfica y dibujo inferior*); SHIL DASSARMA, *Universidad de Mariland (micrografía)/American Scientist*

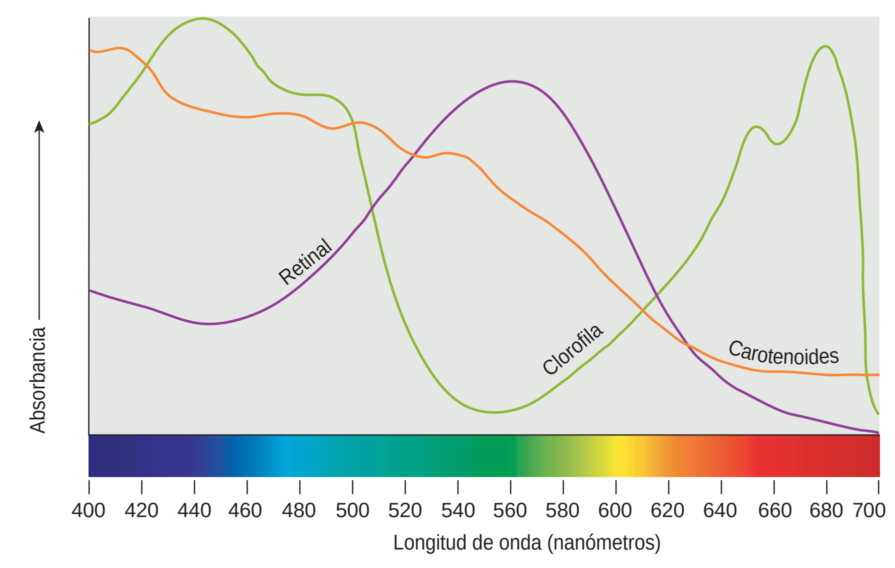
ficos y el análisis de los fragmentos. En el año 2000, convocaríamos en Amherst una reunión internacional de 12 laboratorios, aprovechando las vacaciones de invierno, para identificar elementos familiares del genoma.

Semejante análisis constituía una tarea hercúlea en aquellos días. Las herramientas informáticas para analizar genomas se hallaban en pañales. Tuvimos que desarrollar nuestros propios programas informáticos y examinar a mano la mayoría de los datos.

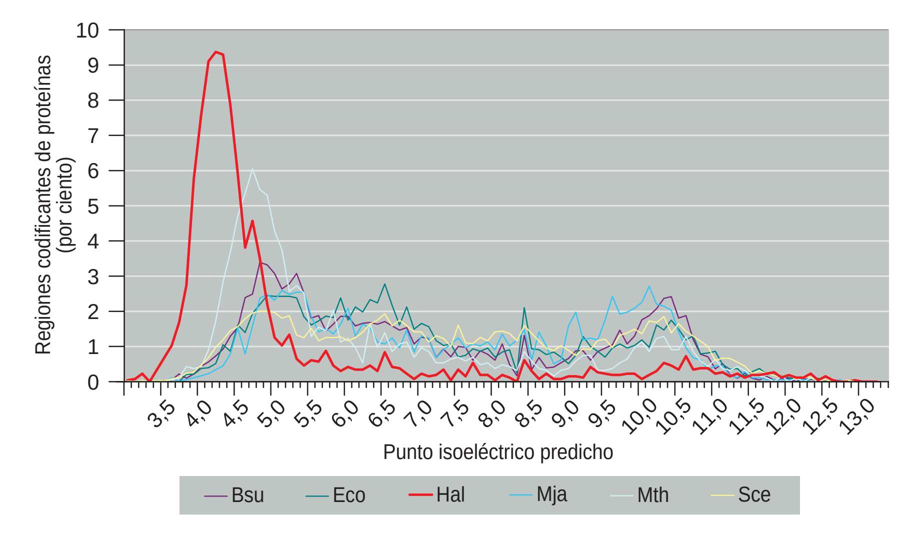
De los descubrimientos logrados en esa secuenciación brillaba uno sobremanera: las 2630 proteínas predichas eran, en conjunto, mucho más ácidas que las de otros organismos. El punto isoléctrico medio de las proteínas de *Halobacterium* era de sólo 4,9. (Ese parámetro mide la acidez.) En cambio, el valor equivalente en casi todas las especies que no son haloarqueas se aproxima a la neutralidad, un 7 en esta escala. Las proteínas ácidas están dotadas de una intensa carga negativa que repele otras moléculas ácidas (con carga negativa) como el ADN y el ARN. Sin embargo, resultó que eran ácidas las proteínas encargadas de unirse al ADN, incluidas las piezas del complejo aparato de transcripción del ADN en ARN.

De acuerdo con nuestra experimentación reciente, los factores de transcripción ácidos se unen al ADN sin dificultad en el interior hipersalino de las células de haloarqueas o en tubos de ensayo con solución salina. Tal atracción resulta notoria, pues ambas moléculas están dotadas de carga negativa y, por tanto, deberían repelerse entre sí. Una explicación pudiera ser que las proteínas y el ADN forman una suerte de emparedado con iones positivos que neutralizan los residuos con carga negativa (ácidos). La repulsión mutua entre grupos ácidos facilita la solubilización de las proteínas halófilas en medios donde las proteínas no halófilas precipitarían por efecto salino ("salting out"). Por tanto, las haloarqueas requieren proteínas extremadamente ácidas para mantener las funciones celulares en un medio sobresaturado.

A la secuencia genética completa de NRC-1 ha seguido, en los últimos años, la publicación del genoma de otras cinco haloarqueas: *Haloarcula marismortui*, una especie del mar Muerto que presenta un metabolismo versátil; *Natronomonas pharaonis*, una especie asociada al *p*H elevado (básico) de los lagos alcalinos del Sinaí (muestran una concentración elevada de hidróxido sódico); *Haloferax volcanii*, una especie halofílica más moderada, del lodo del mar Muerto; *Haloquadratum walsbyi*,

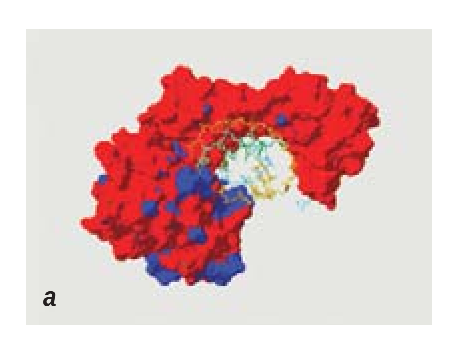


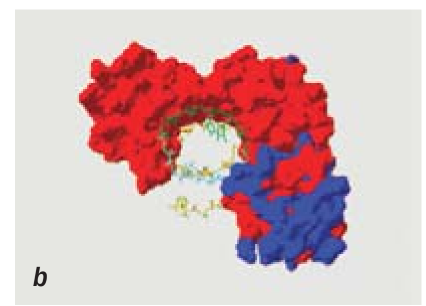

4. EL PIGMENTO RETINAL de la bacteriorrodopsina absorbe la luz verde; en cambio, refleja el rojo y, en menor medida, el final violeta del espectro. Ese patrón de absorción confiere una apariencia púrpura (*línea púrpura*). Los pigmentos clorofílicos absorben el índigo y el rojo, pero reflejan el verde (*línea verde*). Esa relación especular sugiere que la clorofila evolucionó para explotar partes del espectro que no utilizaba el pigmento púrpura. Los carotenoides (*línea naranja*) absorben la luz violeta y ultravioleta (con ello protegen a las haloarqueas de las ondas de alta energía) pero reflejan los colores rojo-anaranjados (de baja energía); ello da lugar a las tonalidades escarlatas que se ven en numerosas salinas. (Para facilitar la comparación, los espectros no se han representado a escala.)

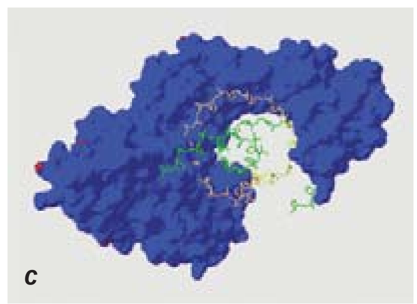


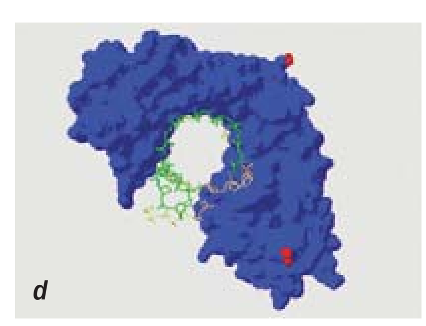

5. NRC-1 Y OTRAS HALOARQUEAS contienen proteínas muy ácidas; así lo indican los valores bajos del punto isoeléctrico (*p*I). Según las secuencias genómicas predichas, el perfil isoeléctrico de las proteínas de NRC-1 (*línea roja*) presenta mayor acidez que el de *Bacillus subtilis* (Bsu), *Escherichia coli* (Eco), *Methanococcus janaschii* (Mja), *Methanothermobacter thermoautotrophicus* (Mth), *Saccharomyces cerevisiae* (Sce) y otros organismos unicelulares. Las cadenas laterales ácidas de esas proteínas facilitan que NRC-1 permanezca en solución en salmueras concentradas.

BARBARA AULICINO/*American Scientist*

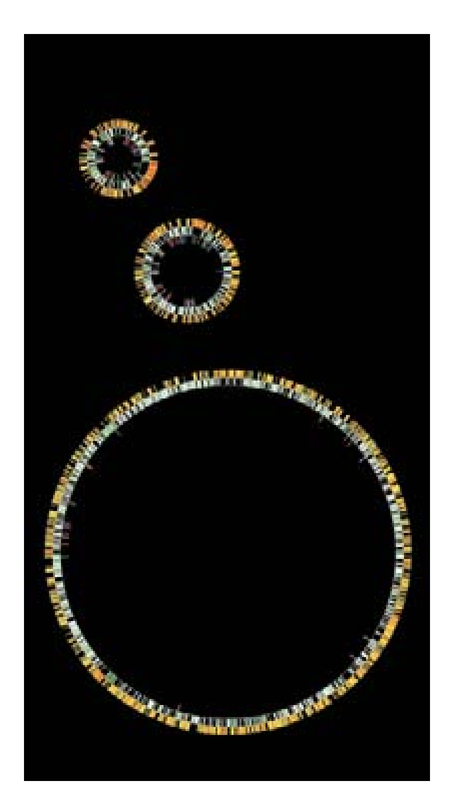



6. LA FORMA DE UN COMPLEJO PROTEICO de unión al ADN en *Halobacterium* NRC-1 (*a* y *b*) es similar a la de *Homo sapiens* (*c* y *d*), luego de cientos de millones de años de evolución independiente. En cambio, difieren radicalmente las cargas eléctricas de la superficie. En esta imagen, el rojo corresponde a las cargas negativas (zonas ácidas); el azul, a las positivas (zonas básicas). En el centro del complejo proteico (constituido por dos proteínas, TBP y TFB) se halla la molécula de ADN (en verde el gen activo, en rosa y naranja zonas no codificantes). Las cargas negativas dificultan la atracción y la unión al ADN, puesto que éste, al ser ácido, también presenta una carga neta negativa. La solución quizás estribe en una capa de iones positivos emparedados entre las moléculas ácidas que se repelen entre sí. Las vistas en *a* y *c* ilustran el complejo proteico engarzado en la cadena de ADN que penetraría en la página; *b* y *d* muestran el mismo complejo saliendo de la página.



7. EL GENOMA DE *HALOBACTERIUM* NRC-1 consta de tres piezas circulares de ADN: un cromosoma grande de unos dos millones de bases y dos plásmidos de 191.000 y 365.000 bases. Los plásmidos pueden haber vehiculado la transferencia de ADN entre microorganismos durante la evolución de las haloarqueas.

SHIL DASSARMA, *Universidad de Mariland/American Scientist*

cuadriforme y común en las salinas; y *Halorubrum lacusprofundii*, una especie adaptada al frío de un lago antártico. Los seis genomas dan fe de la diversidad de las haloarqueas.

## Reliquias de la evolución

La decodificación del genoma de NRC-1 planteaba nuevas cuestiones al tiempo que daba respuesta a otras abiertas relacionadas con la historia evolutiva, o filogenia, de las haloarqueas. Aunque los datos confirmaban que NRC-1 correspondía a una arquea genuina, el gen que suele utilizarse como cronómetro evolutivo, el ARN ribosómico 16S, presentaba una secuencia única que dificultaba la clasificación de la especie. Esa contradicción desafiaba a cuantos trabajan en taxonomía.

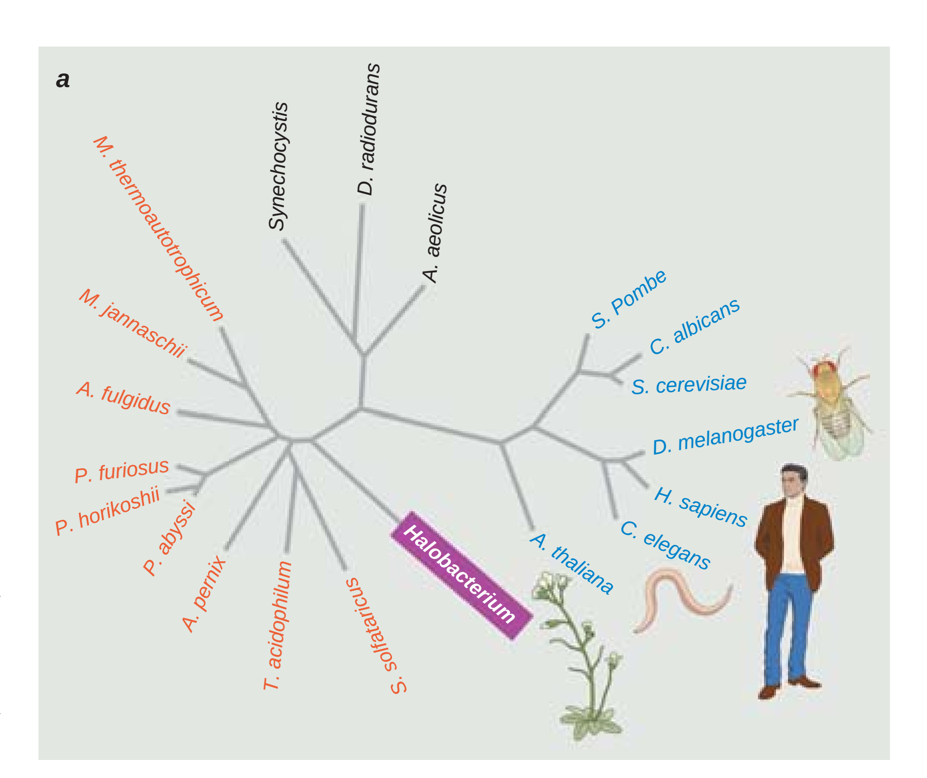
En fecha reciente, se redenominaron numerosas especies de *Halobacterium* sobre la base de la secuencia genética, una opción que no resultaba factible para NRC-1, dada su ambigüedad en este aspecto. Existe ahora una controversia sobre el nombre "*Halobacterium* especie NRC-1", que aviva el fuego de un debate acerca del sentido y significado del término "especie" en los procariotas. En la opinión de algunos expertos, el concepto de especie resulta inapropiado para los procariotas; debería sustituirse por "cepa" o "filotipo".

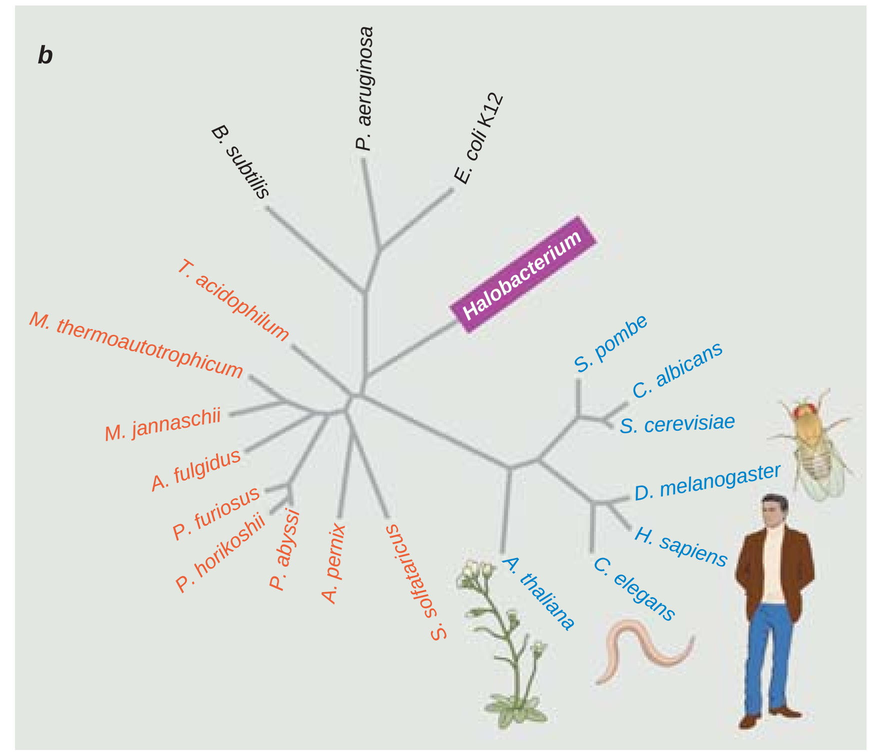
Con el propósito de resolver ese rompecabezas filogenético, mis colaboradores y yo comparamos el genoma de NRC-1 con los escasos genomas entonces disponibles. El análisis preliminar detectó una semejanza interesante entre *Halobacterium* NRC-1 y dos bacterias auténticas: el grampositivo formador de esporas *Bacillus subtilis* y el radiorresistente *Deinococcus radiodurans*. Sin embargo, conforme las bases de datos genómicas han ido creciendo en número de especies, la posición de *Halobacterium* en el árbol de la vida parece haberse desplazado: hacia la base de la rama de las arqueas o, para mayor sorpresa, hacia la rama de las bacterias.

Tal reubicación discrepaba de análisis precedentes que colocaban a *Halobacterium* entre las arqueas. La discrepancia podría deberse a que, en el curso del tiempo, las arqueas halófilas habrían adquirido numerosos genes de especies bacterianas, sin parentesco, a través de un proceso de transferencia génica lateral. De hecho, algunos estudios llegaron a la conclusión de que NRC-1 contenía casi tantos genes bacterianos como de arqueas, lo que planteaba la posibilidad de que estos peculiares microorganismos empezaran siendo una mezcolanza procariota.

Pese a las lagunas de la historia de la evolución procariótica, las pruebas que apoyan la transferencia lateral de genes en las haloarqueas se revelan sólidas. Así, los genes que posibilitan el metabolismo aeróbico de *Halobacterium* presentan la misma

8. LA CLASIFICACION FILOGENETICA de *Halobacterium* NRC-1 entraña ciertas dificultades. Según qué partes del genoma se estudien, NRC-1 muestra un parentesco más estrecho con las arqueas (*rojo*), según se indica en *a*, o con las bacterias (*negro*), según se ofrece en *b*. Aunque resulte sorprendente, algunas regiones del genoma de NRC-1 guardan mayor semejanza con los genes de eucariotas (plantas, animales y levaduras, *azul*). Esa gavilla de semejanzas sugiere que NRC-1 incorporó ADN de otros organismos en numerosas ocasiones durante su evolución, mediante transferencia génica lateral.




BARBARA AULICINO/*American Scientist*

organización que los de la bacteria *Escherichia coli*. También las secuencias génicas son parecidas a las de las bacterias. La combinación de genes ribosómicos que guardan semejanza con los de arqueas anaerobias y los genes metabólicos parecidos a los de bacterias aerobias sugieren que las haloarqueas se han adaptado al oxígeno mediante la apropiación, por transferencia génica lateral, de piezas de la maquinaria respiratoria bacteriana. Se supone que esos procesos ocurrieron en una fase temprana de la historia de la Tierra, cuando las cianobacterias fotosintéticas empezaron a oxigenar la atmósfera. Sin embargo, no se puede descartar la posibilidad de transferencias múltiples, incluidas algunas más recientes.

En *Halobacterium* NRC-1 hallamos un ejemplo moderno de transferencia génica lateral en el gen que codifica la arginil-ARNt sintetasa (ArgS), enzima esencial para la síntesis de proteínas. Los parientes más próximos de la proteína ArgS de NRC-1 se encuentran entre las ArgS de bacterias, no en las de otras arqueas o haloarqueas. Lo que no deja de sorprender si sabemos que las arqueas que precedieron a NRC-1 son anteriores a las bacterias. De acuerdo con el escenario más plausible, tras la captura de un gen bacteriano para ArgS, se perdió en *Halobacterium* NRC-1 la versión arqueana del mismo.

ArgS no constituye el único ejemplo de ese tipo. Según las predicciones de la secuencia genómica, cerca de 40 genes en los dos replicones pNRC codifican proteínas esenciales, incluidas algunas implicadas en la síntesis del ADN y el ARN, así como las que utilizan oxígeno para la respiración celular. Dado que la célula no puede vivir sin esos genes, los replicones pNRC que los contienen deberán denominarse minicromosomas, y no plásmidos.

Los plásmidos, que se caracterizan por su dispensabilidad, desempeñan en NRC-1 dos funciones importantes al menos: operan como reservorios de genes capturados y como vehículos para la transferencia lateral de esos genes. Y cuando tales genes devienen críticos para la supervivencia, su transferencia puede suponer que un replicón procariótico evolucione de plásmido en cromosoma.

Entre las cuestiones evolutivas de mayor interés sobre los halófilos sobresale la del origen de la bacteriorro-

dopsina, la proteína componente de la membrana púrpura. La bacteriorrodopsina guarda una estrecha relación con las rodopsinas de mamíferos; igual que éstas, porta retinal, una sustancia esencial para la percepción de la luz a través de la retina. *Halobacterium* NRC-1 y otras haloarqueas cuentan también con otras proteínas con retinal: la halorrodopsina, que bombea iones cloruro a través de la membrana, y las rodopsinas fotosensibles, que discriminan entre fuentes de luz útiles y fuentes peligrosas, amén de controlar el comportamiento natatorio de la célula.

Los científicos debaten todavía la larga trayectoria evolutiva de esas proteínas con retinal. Aunque su hallazgo en las haloarqueas hizo suponer que tales proteínas eran exclusivas de este grupo, se han descubierto proteínas similares en otras bacterias y en eucariotas. Pudieron, pues, haberse originado antes que divergieran bacterias, arqueas y eucariotas, hace miles de millones de años tal vez. Como posibilidad alternativa cabría que las proteínas con retinal pasaran, por transferencia génica lateral, a las bacterias planctónicas, ciertos hongos y haloarqueas.

Aunque seguimos sin conocer la filogenia de los pigmentos basados en el retinal, resulta atractiva la hipótesis de una coevolución con los pigmentos clorofílicos. Si se comparan los patrones de absorción de ambos tipos de pigmento, se observa que el retinal y la clorofila presentan espectros complementarios, no superpuestos.

En el marco de esa hipótesis, evolucionaron primero los pigmentos basados en el retinal, más sencillos. A ellos recurrieron los microorganismos que dominaron la fase anaeróbica, "púrpura", de la existencia del planeta, para obtener energía a partir de la luz solar. Aparecieron luego pigmentos clorofílicos, de mayor complejidad; facilitaban la absorción de la luz de regiones del espectro solar que no absorbían las especies preexistentes. El éxito de esa estrategia llevó a la fase "verde" de la evolución de la Tierra; también a la consecuente oxidación de la atmósfera por la fotosíntesis. Los cambios operados desplazaron a la mayoría de los microorganismos basados en el retinal. Aunque se mueve en el terreno de la especulación, ese relato de los hechos nos sugiere que la nutrición basada en el aprovechamiento de la luz solar mediante el retinal constituye una de las formas de metabolismo más antiguas del planeta.

## Medios de supervivencia

Las haloarqueas soportan condiciones estresantes que matarían a otros microorganismos. Por ejemplo, *Halobacterium* NRC-1 tolera la radiación solar intensa y la radiación ionizante, que en la mayoría de los organismos causan daños generales al ADN. Esta proeza le resulta posible merced a la producción de carotenoides rojos y anaranjados y un abultado número de otros pigmentos que protegen el genoma. NRC-1 contiene también doble dosis (una versión bacteriana y otra eucariótica) de las enzimas empleadas en la reparación del ADN.

La fotoliasa revierte el daño causado por la radiación ultravioleta durante el día. La exposición a la luz ultravioleta desencadena la producción de una recombinasa, que ayuda a la reparación del ADN mediante la promoción de la recombinación homóloga (con el uso de una copia buena del gen para arreglar la copia dañada). Una tercera enzima, la exonucleasa, poda los fragmentos de ADN dañado. La recombinasa y la exonucleasa resultan clave para la reparación que se lleva a cabo por la noche, cuando las células gastan su energía en remendar los genomas dañados por el sol. La radiación de alta energía y la desecación producen otro tipo de daño: provocan la rotura de las dos hebras de la doble hélice del ADN. Las células así irradiadas fabrican copias de la proteína replicativa A, que se unen a los fragmentos

### APLICACIONES DIDACTICAS DE LAS HALOARQUEAS

El halófilo *Halobacterium* NRC-1 resulta un modelo ideal para la enseñanza de la microbiología básica. La elevada salinidad de los medios necesarios para su cultivo evita la contaminación por otros tipos de bacterias u hongos. (El mismo principio gobierna la conservación de los alimentos en la sal, al evitar el crecimiento de microorganismos que los estropeen.) Los experimentos a realizar en clase no requieren, pues, protocolos de esterilidad. (Estos protocolos ponen a veces en auténtico aprieto a los investigadores profesionales.) Además de ayudar a mantener los resultados claros, las condiciones de hipersalinidad evitan el desarrollo de cepas de microorganismos patógenos.

Cuando crecen en el laboratorio, los cultivos líquidos de NRC-1 presentan un color rosado llamativo (*abajo, derecha*); también la presencia de colonias con sectores rosas, rojo-anaranjados (*abajo, izquierda*) les resulta intrigante. Los alumnos pueden observar y estudiar el nexo entre genotipo y fenotipo a través de la presencia/ausencia de orgánulos que confieren a las células flotabilidad. Esos orgánulos llenos de gas resultan fáciles de aislar en un laboratorio rudimentario; pueden ensayarse sus propiedades funcionales mediante una serie de experimentos rápidos.

La investigación escolar de NRC-1 no resulta onerosa: se desarrolla en medios de cultivo baratos y de fácil obtención y manipulación. Su velocidad de crecimiento (de tres a siete días de cultivo) se adapta a unas prácticas semanales. Los estudiantes más avanzados usan NRC-1 para el aprendizaje de técnicas básicas de biología molecular y manipulación genética. Al finalizar los experimentos, NRC-1 se guarda en cristales de sal (*arriba, izquierda*) a temperatura ambiente durante largos períodos de tiempo. (Si fuera necesario, hasta miles de años.)

*—Priya DasSarma, Universidad de Maryland*





SHIL DASSARMA, *Universidad de Maryland/American Scientist*

de ADN de hebra sencilla expuestos; junto con la recombinasa, ayudan a evitar daños genéticos.

Por su parte, los metales tóxicos y las concentraciones variables de iones inducen cambios en la expresión génica que contribuyen a la supervivencia de *Halobacterium* NRC-1. Así, las células resisten los efectos tóxicos del arsénico mediante la activación de un conjunto de genes que codifica enzimas que cambian el estado de oxidación del metal y lo preparan para su transporte activo fuera de la célula. La identidad de la bomba propiamente dicha sigue envuelta en el misterio. Podría haber un mecanismo novedoso de las arqueas. Otro gen cerca del grupo del arsénico parece formar parte de un segundo sistema de detoxificación, que transforma el arsenito en trimetilarsina, una forma volátil.

NRC-1 responde de varias maneras a la falta de oxígeno. Por ejemplo, mediante la producción de vesículas rellenas de gas que confieren flotabilidad y desplazan las células hacia zonas oxigenadas de la columna de agua. Si las condiciones son absolutamente anóxicas, las células cambian a un modo alternativo de obtención de energía: utilizan el dilmetil sulfóxido, producido por otros microorganismos, y el N-óxido de trimetilamina, producido por los peces, para llevar a cabo la respiración anaeróbica.

NRC-1 responde a la escasez de oxígeno con un incremento de la producción de bacterioopsina, la parte proteica de la bacteriorrodopsina que se usa para el crecimiento fototrópico. La síntesis de la bacterioopsina depende de la concentración de retinal; las dos moléculas reaccionan para formar un complejo. De hecho, los genes que codifican la primera y última etapa de la síntesis del retinal y el gen sensor-activador localizado cerca se inducen de forma coordinada en condiciones de baja concentración de oxígeno.

Los expertos no han logrado desentrañar el modo en que NRC-1 regula los distintos conjuntos de genes en respuesta al estrés ambiental. Con mis colaboradores he propuesto un mecanismo que explica parte de esa complejidad. Según nuestra hipótesis, dos factores de trascripción generales, TBP y TFB, que en ocasiones resultan ignorados (se les considera aburridos y monótonos frente a otros procesos más dinámicos), operan como reguladores. Aunque las proteínas TBP y TFB suelen estar codificadas por un solo gen en arqueas y eucariotas, *Halobacterium* NRC-1 lleva seis genes para TBP y siete para TFB; cabe, pues, la posibilidad de que se produzcan numerosas combinaciones distintas de TBP y TFB durante la trascripción. Ciertas parejas quizás activan conjuntos de genes que operan en coordinación, por medio de secuencias reguladoras situadas cerca de los genes en cuestión.

Otros científicos han propuesto un mecanismo similar para la coreografía génica que regula el desarrollo de organismos superiores. En fecha reciente hemos hallado pruebas de que en las haloarqueas podría intervenir un mecanismo regulador novedoso como éste, que habría evolucionado para enfrentarse a la dinámica y el estrés del medio hipersalino.

## Fuera de este mundo

Dado que las haloarqueas toleran tantas formas de estrés ambiental, he defendido, con otros, su posible supervivencia en Marte. Y no sólo allí. Se trataría, pues, de organismos “exófilos”. La misma durabilidad facilitaría la supervivencia durante el viaje interplanetario, quizás envueltas en cristales de sal, que las protegerían de las radiaciones dañinas. La Agencia Europea del Espacio descubrió en fecha reciente que una cepa de *Haloarcula* sobrevivió varias semanas en el espacio profundo, más que cualquier otro organismo que retuviera la capacidad de dividirse. Ese hallazgo concuerda con la tolerancia a la desecación y la radiación observadas en *Halobacterium* NRC-1 en experimentos de laboratorio. Y respalda los descubrimientos de geólogos que han aislado ADN de haloarqueas similares a NRC-1 de depósitos de halita (sal) de más de 10 millones de años de antigüedad.

Algunos de los fragmentos de roca marciana que han llegado a la Tierra, incluido el meteorito que cayó en Shergotty (India) y el de Nakhla (Egipto), contenían cristales de sal. Por tanto, quizá los meteoritos operen como vehículos de transporte interplanetario de haloarqueas. En ese contexto, resulta comprensible el interés que han despertado algunas publicaciones sobre la existencia de microorganismos halófilos que perviven tras permanecer atrapados en depósitos de salmuera durante cientos de millones de años. (Aunque esos estudios no se han sometido todavía a los rigurosos criterios de la validación científica.)

Con todo, el rango de adaptación de las haloarqueas a condiciones extremas sugiere que resulta prematuro descartar la idea de vida marciana. No hay datos suficientes que confirmen o refuten la hipótesis de que la Tierra ha intercambiado formas de vida microbiana con otros cuerpos planetarios en algún momento de su historia. Por ahora, la mera *posibilidad* de que existan formas de vida terrestre en otros planetas ya es en sí misma toda una proeza.

## El autor

**Shiladitya DasSarma** enseña en el Centro de Biotecnología Marina de la Universidad de Maryland.


## Bibliografía complementaria

GENOME SEQUENCE OF AN EXTREMELY HALOPHILIC ARCHAEON. S. DasSarma en *Microbial Genomes*, dirigido por C. M. Fraser, T. Read y K. E. Nelson. Humana Press; Totowa, Nueva Jersey, 2004.

HALOPHILES. S. DasSarma y P. DasSarma en *Encyclopedia of Life Sciences*. John Wiley & Sons, Ltd.; Chichester, 2006.

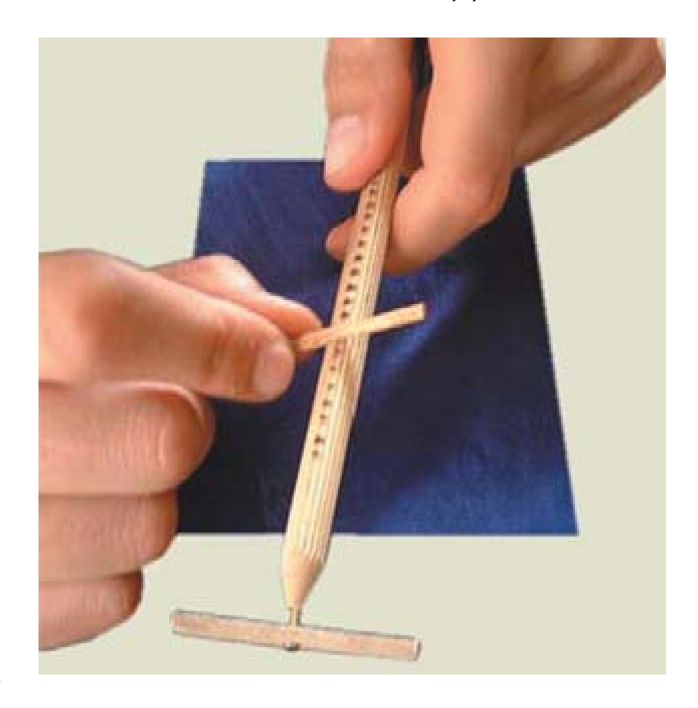
EXTREME HALOPHILES ARE MODELS FOR ASTROBIOLOGY. S. DasSarma en *Microbe*, vol. 1, págs. 120–127; 2006.

POST-GENOMICS OF THE MODEL HALOARCHAEON *HALOBACTERIUM* SP. NRC-1. S. DasSarma, B. R. Berquist, J. A. Coker, P. DasSarma y J. A. Müller en *Saline Systems*, vol. 2, pág. 3; 2006.

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

# El *bozo-bozo*

El *bozo-bozo*, como llaman en Francia al singular juguete de que se habla en este artículo, debería atraer la atención de los aficionados a la física



El *bozo-bozo* es un una pequeña barra con muescas. En su extremo lleva una hélice sujeta por un clavo. Cuando frotamos esas muescas con un palillo, ¡la hélice se pone a girar en torno al clavo! Podemos incluso controlar el sentido de giro de la hélice. El *bozo-bozo* realiza así un antiguo sueño: la conversión de un movimiento alterno en uno circular. Los principios de la física explican su funcionamiento, aunque subsisten zonas en sombra.

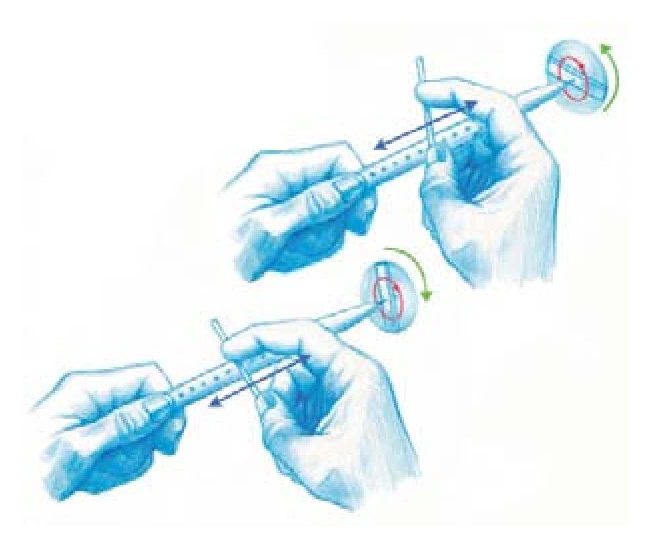
## *Bozo-bozo*, brazalete y hula-hop

La hélice del *bozo-bozo*, con un taladro central de diámetro mayor que el del clavo que la atraviesa, gira libremente en torno a su eje; con un golpecito, rota durante tres o cuatro segundos. La gracia del *bozo-bozo* es la siguiente: la hélice girará si se frotan las muescas de la varilla con un palillo.

Durante esas vibraciones, la hélice sólo tiene contacto con el clavo; por tanto, sólo éste la hace girar. Sin embargo, el clavo, inserto en la madera, no gira sobre sí mismo. Para resolver esta paradoja, nos remitiremos a una operación más familiar: hacer rotar un aro de hula-hop alrededor del cuerpo, o un brazalete holgado en torno del brazo. Con el brazalete situado a la altura de la muñeca o del antebrazo, efectuamos con el brazo extendido un amplio movimiento circular. Cada punto del brazo recorre un círculo. Si ese movimiento del brazo es rápido, la fuerza centrífuga mantendrá el aro en contacto con el brazo; el centro del aro describirá un círculo en torno al brazo.

Cambiemos ese movimiento. Alcemos rápidamente el brazo cuando el brazalete se acerca a su posición más baja y el punto de apoyo está arriba. Ese impulso creará sobre el aro un par y acelerará su rotación. Detengamos el brazo cuando el aro empiece a subir y bajémoslo de golpe cuando se dirija hacia su posición alta. También





1. El movimiento del hula-hop (*a*) se mantiene por una acción parecida a la que ejerce el palillo cuando se frotan con él las muescas del *bozo-bozo* (*b*). El pie ejerce sobre el aro una fuerza (*malva*) que se descompone en una componente perpendicular (*azul*), que mantiene el contacto entre el aro y el tobillo, y una componente tangente al aro (*roja*), que lo hace girar en torno a sí mismo (*flechas verdes*) como la hélice del *bozo-bozo*. El movimiento del clavo del extremo de la varilla de las muescas es un movimiento circular (*rojo*) generado por la vibración de la varilla; el rozamiento arrastra la hélice.

JESWEB (*arriba*); BRUNO VACARO/*Pour la Science*

esta vez, el par ejercido acelerará el brazalete. Así, una sencilla oscilación vertical del brazo, adecuadamente sincronizada, mantiene el movimiento del aro. Los aficionados al hula-hop saben que una vez superadas las hábiles contorsiones necesarias para cebar el movimiento, basta con ondular el cuerpo de adelante atrás para mantener la rotación del aro alrededor del cuerpo.

Conocemos que el centro del brazalete describe un círculo. Aún falta demostrar que el brazalete, como la hélice del *bozo-bozo*, gira sobre sí mismo. Ocupémonos de la fuerza que el brazo ejerce sobre el brazalete en el punto de contacto. Tal fuerza tiene una componente perpendicular a la superficie del aro y una segunda componente paralela a esa superficie. Esta última es una fuerza de rozamiento que se opone al deslizamiento del brazalete sobre el brazo. Sobre éste ejerce un par que lo obliga a rotar sobre sí mismo, de tal modo que rueda sin deslizar sobre el brazo en el mismo sentido que el movimiento inicial del brazo. Es una situación similar a la de un engranaje. Se deduce que la velocidad de rotación del aro sobre sí mismo es igual al producto de la velocidad de rotación de su centro en torno al brazo por el diámetro del aro dividido por la diferencia entre su diámetro y el del brazo.

Ese mecanismo convierte el movimiento circular del brazo en una rotación del brazalete sobre sí mismo. ¿Explica también el funcionamiento del *bozo-bozo*? Algunas experiencias, que cualquiera puede reproducir, permiten concluir que sí. El movimiento del clavo se determina sujetando un lápiz en la varilla del juguete. La longitud añadida amplía el desplazamiento del extremo, mientras que la mina permite registrar ese movimiento en un papel (que haremos circular lentamente para facilitar la lectura de la traza del lápiz). Las trazas no admiten dudas: cuando se frota el juguete de modo que la hélice gire, el clavo describe una trayectoria más o menos circular en el sentido esperado (*véase la figura 2*).

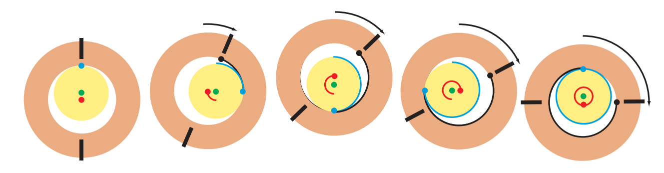
Una segunda experiencia permite comprobar que, igual que con el brazo, una simple vibración del clavo de abajo arriba mantiene el giro de la hélice, cualquiera que sea el sentido, cuando la rotación está iniciada. Para ello basta un leve golpecito sobre la hélice, después de frotar el *bozo-bozo* con el palillo.

Por último, con un láser, un fotodiodo o un osciloscopio podemos comparar la frecuencia de rotación de la hélice con la de vibración de la varilla: ésta es del orden de cuatro veces más pequeña. Concuerda perfectamente con una rodadura sin deslizamiento de la hélice sobre el clavo, puesto que en el *bozo-bozo* de los autores el diámetro del clavo es igual a tres cuartos del diámetro del taladro de la hélice (*figura 2*).

## Movimiento asimétrico del clavo

La rotación de la hélice se debe, pues, al movimiento circular del extremo del clavo. Ese movimiento está seleccionado y controlado por la presión lateral que sobre el juguete ejerce uno de los dedos de la mano (pulgar o índice) que sujetan el palillo con el que se frotan las muescas. Para explicar ese efecto de la mano, se han propuesto muchas explicaciones. A falta de pruebas decisivas, hagamos como Sherlock Holmes: si eliminamos las explicaciones erróneas, la que quede será la buena.

BRUNO VACARO/*Pour la Science*



2. La hélice (*anillo ocre, palas esquematizadas por dos trazos negros*) rueda sin deslizar alrededor del clavo (*amarilla*). El centro de la hélice (*punto rojo*) describe un círculo en torno al centro del clavo (*en verde*). Cuando la hélice gira alrededor del clavo, su punto de contacto (*en azul*) recorre la misma distancia sobre el clavo (*trazo azul*) que sobre el anillo (*trazo negro*). Después de una vuelta, el punto de contacto inicial (*en negro*) ha recorrido una distancia igual a la diferencia entre el perímetro interior del anillo ocre y el perímetro del clavo. Así, la frecuencia de rotación de la hélice es un cuarto de la frecuencia de rotación del clavo, que es precisamente la frecuencia de vibración de la varilla.

Se empezó intentando explicar el movimiento del clavo con ayuda de ondas que se propagarían por la madera, mantenidas por el movimiento del palillo. Para el *bozo-bozo*, las frecuencias de tales ondas rebasarían largamente el kilohertz. Son, por tanto, mucho mayores que la frecuencia de excitación de 50 hertz que resulta de recorrer en un segundo las 25 muescas del juguete. Para convencerse de que esta hipótesis no es acertada, sujétese en un torno el extremo de la varilla opuesto a la hélice. Así, el clavo no podrá moverse, a menos que el juguete se deforme. Se comprueba en este caso que es muy difícil hacer que rote la hélice, señal de que las deformaciones son muy pequeñas y las ondas, inoperantes.

Según otra hipótesis, el contacto con el dedo crea un punto fijo alrededor del cual podría girar el juguete. Así, el movimiento del clavo no consistiría en una oscilación vertical, sino en vaivenes sobre un arco de circunferencia. Pero se comprueba que, si se apoya el juguete en un auténtico punto fijo (como el canto de una mesa), la hélice no gira. ¿Cuál es entonces el papel del dedo contra el que se apoya la varilla?

Desde luego, siempre puede decirse que el apoyo provoca una asimetría a lo largo de la varilla y que al movimiento vibratorio rectilíneo del extremo lo sustituye un movimiento elipsoidal más general. Puede precisarse más. Lo más racional es sostener que a la excitación vertical ejercida por el palillo se agrega una excitación horizontal ejercida por el dedo. Es decir, al movimiento vertical del clavo se superpone un movimiento horizontal. No hay razón para que ambos movimientos sean de la misma amplitud ni síncronos, ya que el palillo es rígido y el dedo, más blando. De ello resulta que el clavo describe una elipse. Por impecable que parezca, este razonamiento no explica por qué el clavo describe una elipse en sentido horario estando el apoyo a la izquierda.

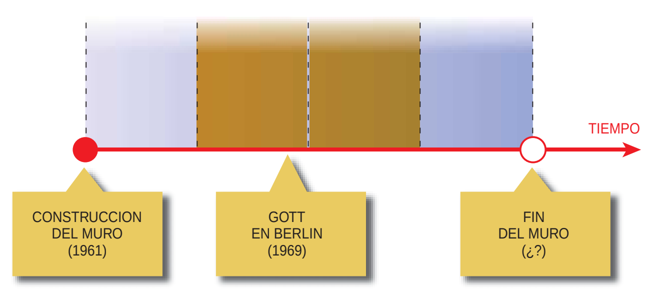
Así pues, hay trabajo para los aficionados a la física y los físicos aficionados que deseen desvelar los misterios del *bozo-bozo*. Quizá los más perseverantes se apliquen al enigma del *bozo-bozo* doble: ¿Cómo hacer rotar y controlar la rotación de un segundo *bozo-bozo* que no se frota, que sólo está en contacto con el primero?

Juan M.R. Parrondo

# Sutilezas estadísticas

En los años noventa circuló en ambientes científicos un sorprendente resultado estadístico que más tarde resultó ser un fiasco: la *regla de Gott*, un método sencillo, pero sorprendentemente general, para estimar la duración de un fenómeno cualquiera.

J. Richard Gott III es un imaginativo cosmólogo de la Universidad de Princeton que ha trabajado en temas muy sugerentes, como la posibilidad de viajar en el tiempo. En 1969 realizó un viaje por toda Europa y, ante el Muro de Berlín, se le ocurrió el siguiente argumento. Su visita a Berlín no tenía nada de especial. Podría haber sucedido en cualquier momento de la existencia del Muro. Cabe pensar entonces que ocurre en un instante al azar de la vida del Muro. Si dividimos dicha vida en cuatro partes iguales, tal y como se muestra en la figura 1, la probabilidad de que la visita de Gott ocurra en uno de esos cuatro intervalos es 1/4. Por tanto, la probabilidad de que la visita se dé en los dos intervalos centrales (*marrón en la figura 1*) es 1/2. Pero, si la visita acontece en estos dos intervalos, el Muro no puede durar menos de 8 + 8/3 años, ni más de 8 + 3 × 8 años.




1. El argumento *copernicano* de Gott: la probabilidad de que la visita de Gott al Muro de Berlín se realizara en el intervalo de tiempo indicado por los rectángulos marrones es 1/2.

La primera cota se obtiene suponiendo que la visita se produce al final de los dos intervalos centrales, con lo que la duración de cada intervalo sería de 8/3 y al Muro le quedaría sólo un intervalo, es decir, 8/3 de año, y su duración total sería la suma de los cuatro intervalos, 8/3 × 4 años. La segunda cota se obtiene suponiendo que la visita se produce al principio de los dos intervalos centrales, con lo que cada intervalo dura 8 años y al muro le quedan esos dos intervalos más el cuarto, es decir, tres intervalos de 8 años de duración. Por lo tanto, con probabilidad 1/2, la vida del Muro tiene que estar comprendida entre 10 años y 8 meses y 32 años. Es decir, el Muro, razonó Gott en 1969, caerá, con probabilidad 1/2, entre 1972 y 1993.

Veinte años después de su visita a Berlín, en 1989, el muro caía; Gott recordó su viejo argumento y pensó que merecía la pena ahondar algo más. El argumento puede aplicarse para estimar la duración de cualquier fenómeno, sin más que saber cuándo comenzó y suponiendo que lo observamos en un instante completamente aleatorio dentro del tiempo de vida del mismo.

A esta suposición Gott la llama *principio copernicano*. Copérnico fue quien propuso una nueva imagen del cosmos en la que la Tierra ya no era el centro del universo, como creía el sistema ptolemaico. En el universo copernicano la Tierra no tiene un estatuto especial, sino que ocupa una región más del universo. Esta declaración, extendida también al tiempo, se conoce en cosmología como principio copernicano. Según el principio copernicano ni la Tierra ocupa un lugar especial en el universo ni el presente tiene nada de especial en la historia del mismo. Para Gott, la expresión matemática de ese principio, aplicada a la observación de cualquier fenómeno independiente del observador, es que el tiempo $t$ de observación es un instante elegido al azar dentro del intervalo de vida del fenómeno.

El argumento de Gott puede generalizarse a márgenes de confianza superiores a 1/2. Supongamos que un fenómeno se inició en un tiempo $t_0$ y que lo observamos en un tiempo $t$. Si la duración total del fenómeno es $T$, supondremos que $t$ es un número aleatorio entre $t_0$ y $t_0 + T$. Entonces, la probabilidad de que $t$ se encuentre entre $t_0 + aT$ y $t_0 + (1 - a)T$ es la fracción que ocupa el área marrón en la figura 2, es decir:

$$\text{Prob}\,[t_0 + aT \leq t \leq t_0 + (1-a)T] = 1 - 2a$$

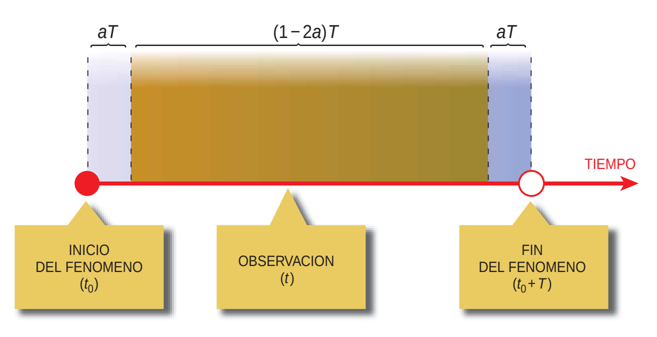
Consideramos ahora los dos casos extremos: que la observación ocurre al principio del intervalo marrón, $t = t_0 + aT$, o que ocurre al final de dicho intervalo, $t = t_0 + (1 - a)T$; y obtenemos así la cota superior e inferior para la duración $T$ del fenómeno:

$$\frac{t - t_0}{1 - a} \leq T \leq \frac{t - t_0}{a}$$

Esta desigualdad se debe satisfacer con una probabilidad $1 – 2a$, que suele denominarse *nivel de confianza*. Por ejemplo, para $a = 1/4$, obtenemos un nivel de confianza del 50 % y el intervalo que dedujo Gott en su visita a Berlín en 1969. Si queremos un nivel de confianza del 95 %, tendremos que utilizar $a = 0{,}0025$, con lo cual el intervalo de confianza es más amplio:

$$\frac{40}{39}(t - t_0) \leq T \leq 40\,(t - t_0)$$

En su artículo en *Nature* de 1994, Gott aplicó esta fórmula a toda clase de fenómenos y situaciones: la vida de la Unión Soviética, la del mismo Gott, la duración de la especie humana o los años en que seguirá publicándose la propia revista *Nature*. Por ejemplo, la especie humana se originó hace unos 200.000 años. Si aplicamos el principio copernicano a nuestra época,

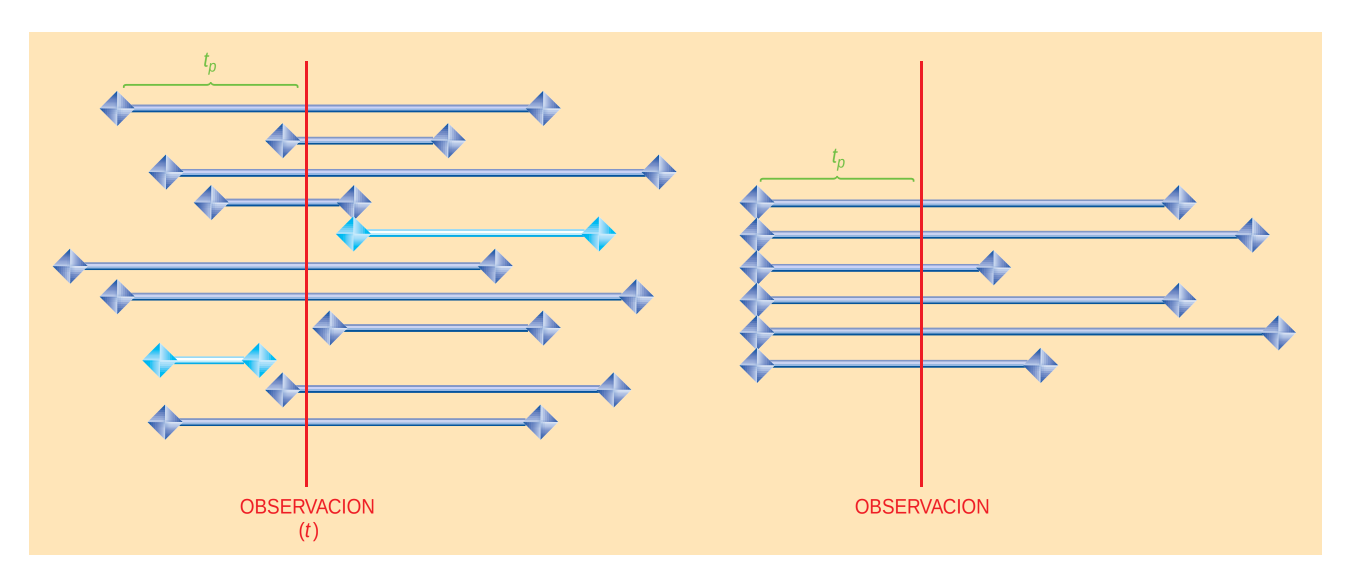



2. Generalización del argumento de Gott.

considerándola un instante cualquier en la historia de la especie y aplicamos el argumento de Gott, obtenemos que, con probabilidad del 95 %, la humanidad sobrevivirá al menos 5100 años pero no más de 7,8 millones de años. Aplicado a una vida humana, el argumento da resultados aparentemente triviales o absurdos. Yo tengo 43 años, por lo que, según Gott, viviré entre 44,1 y 1720 años. Pero un bebé de un mes vivirá, con una probabilidad del 95 %, entre 40/39 = 1,026 y 40 meses, es decir, poco más de 3 años. Del argumento de Gott parece deducirse que el 95 % de los niños de un mes no van a vivir más de 40 meses, lo cual es evidentemente falso. El argumento también falla si lo aplicamos al fenómeno "no salir el cero en la ruleta", puesto que el número de turnos que lleva sin salir el cero no tiene la más mínima influencia sobre las probabilidades de que salga o no salga el cero en los turnos siguientes. En estos casos, ¿no es aplicable el principio copernicano o el argumento es simplemente incorrecto?

Carlton Caves publicó en el año 2000 un artículo muy crítico contra el argumento de Gott, en el que realizaba un análisis *bayesiano* del mismo. Ya hemos hablado en esta sección de este tipo de análisis (*Fósiles y loterías,* abril 2005). El error del argumento de Gott es muy sutil, pero puede entenderse con un sencillo ejemplo. La mejor forma de reflexionar sobre argumentos probabilísticos es suponer que podemos repetir un experimento un gran número de veces. En este caso, admitamos que tenemos muchas copias del fenómeno cuya duración queremos estimar. Tal y como se muestra en la figura 3 (*izquierda*), el comienzo de estas copias y su duración son cantidades aleatorias. De acuerdo con el principio copernicano, en cierto instante al azar $t$ intentamos observar el fenómeno. Lo lograremos en unas ocasiones y en otras no, como se indica en la figura. Vamos a analizar sólo las ocasiones en las que observamos el fenómeno. El tiempo $t_p$ transcurrido entre el comienzo del mismo y la observación es una cantidad variable. El argumento de Gott se basa en que $t_p/T$ es un número aleatorio uniformemente distribuido entre 0 y 1. Esto es rigurosamente cierto. Para convencerse de ello, imaginen la figura 3 (*izquierda*) con un ingente número de copias y piensen en la cantidad $t_p/T$, que es la fracción de segmento que queda a la izquierda de la observación en cada copia. Dicha cantidad puede tomar cualquier valor entre 0 y 1 con igual probabilidad.

Sin embargo, si ahora de entre todas esas copias nos quedamos con las que poseen un determinado valor para $t_p$, según se muestra en el esquema de la derecha de la figura 3, esta hipótesis deja de ser cierta. Imaginen que la duración $T$ es un número aleatorio entre 1 y 10 años y que $t_p$ es 6 años. Entonces, las copias que han sobrevivido a nuestra criba, es decir, las que aparecen en la parte derecha de la figura 3, durarán 6, 7, 8, 9 o 10 años, con probabilidad 1/5. Por lo tanto, $t_p/T$ puede ser igual a 1, 6/7, 6/8, 6/9 o 6/10 y toma cada uno de estos valores con probabilidad 1/5. Como vemos, $t_p/T$ está muy lejos de ser un número uniformemente distribuido entre 0 y 1. De hecho, lo es sólo cuando la probabilidad de la duración $T$ tiene una forma muy particular (proporcional a $1/T^2$). La conclusión de Caves es muy sutil: la hipótesis de Gott es verdadera *sólo* si no conocemos $t_p$; pero si no conocemos $t_p$, ignoramos cuánto tiempo lleva ocurriendo el fenómeno desde su comienzo hasta la observación y, por tanto, no podemos usar el argumento. Por otro lado, si conocemos $t_p$, la hipótesis es falsa. En pocas palabras, el argumento de Gott o bien es falso o bien es inútil.




3. Si no fijamos el tiempo $t_p$ transcurrido entre el comienzo del fenómeno y la observación (*esquema de la izquierda*), la hipótesis de Gott ($t_p/T$ es una cantidad aleatoria entre 0 y 1) es válida. Sin embargo, si fijamos $t_p$ (*esquema de la derecha*) la hipótesis deja de ser cierta.

Mark Fischetti

## SONIDO DIRECCIONAL

### Eh... ¡oiga!

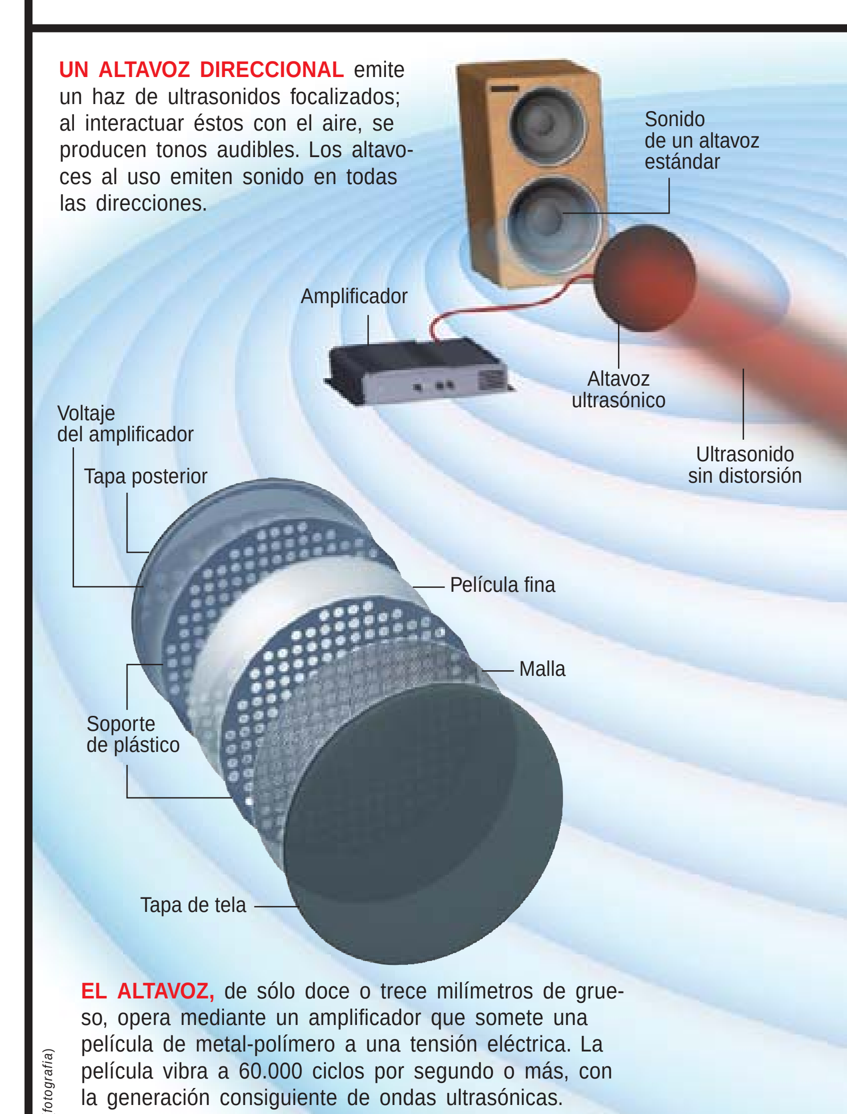
Está usted paseando por entre los anaqueles de una gran superficie dedicada a la venta de comestibles. De pronto, oye una voz: "¿Tiene sed? Cómpreme". Se detiene ante el expositor de refrescos, pero junto a usted no hay nadie; los clientes que se ven a pocos metros no parecen oír nada.

En ese momento, se halla usted en un cilindro de sonido. Mientras que un altavoz emite sonido en todas las direcciones, igual que una bombilla irradia luz, un altavoz direccional proyecta un haz de sonido de modo parecido a un foco. El haz está compuesto de ondas ultrasónicas, que los humanos no podemos oír, pero que emiten tonos audibles al interactuar con el aire. Manejando las matemáticas de esas interacciones, los ingenieros hacen que uno de esos haces transmita voz, música o cualquier otro sonido.

Ya en el decenio de los sesenta, la investigación militar y los expertos en telecomunicaciones trataron de aprovechar el fenómeno, pero sólo consiguieron generar unas señales audibles muy distorsionadas. En 1998, Joseph Pompei, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, desarrolló unos algoritmos que reducían la distorsión a un pequeño porcentaje. Diseñó un amplificador, unos circuitos electrónicos y unos altavoces, con los que logró producir unos ultrasonidos lo bastante limpios para generar un sonido nítido. Registró su técnica como Audio Spotlight. En 1999, fundó la compañía Holosonics en Watertown (Massachusetts). Woody Norris, inventor rival, comercializa un producto que le hace la competencia con el nombre de HyperSonic Sound, fabricado en American Technology Corporation, su empresa de San Diego.

Hay altavoces de Pompei instalados en vestíbulos de empresas, sobre las obras que se exponen en el Museo de Bellas Artes de Boston y en el Centro Epcot de Disneylandia. Los visitantes permanecen en pie ante los artefactos o las videopantallas sin hacer ruido. Ahora, los grandes almacenes buscan adaptar el invento a sus puntos de venta; los fabricantes de autos lo están desarrollando para que los pasajeros oigan sólo su propia música o película.

Los detractores de los altavoces direccionales afirman que en ciertas situaciones los auriculares al uso ofrecen unas ventajas similares; aducen dificultades fortuitas, tales como las reflexiones indeseadas en los asientos de los coches. Pero el obstáculo principal a su expansión lo constituye el precio: un equipo de sonido direccional cuesta de 600 a 1000 dólares.




**UN ALTAVOZ DIRECCIONAL** emite un haz de ultrasonidos focalizados; al interactuar éstos con el aire, se producen tonos audibles. Los altavoces al uso emiten sonido en todas las direcciones.

**EL ALTAVOZ,** de sólo doce o trece milímetros de grueso, opera mediante un amplificador que somete una película de metal-polímero a una tensión eléctrica. La película vibra a 60.000 ciclos por segundo o más, con la generación consiguiente de ondas ultrasónicas.

Ultrasonido sin distorsión — Ultrasonido con distorsión — Onda audible

**LAS ONDAS ULTRASONICAS UNIFORMES** (*izquierda*) producen fluctuaciones en la densidad del aire. Esas fluctuaciones distorsionan las ondas (*centro*), que emiten entonces un tono audible (*derecha*).

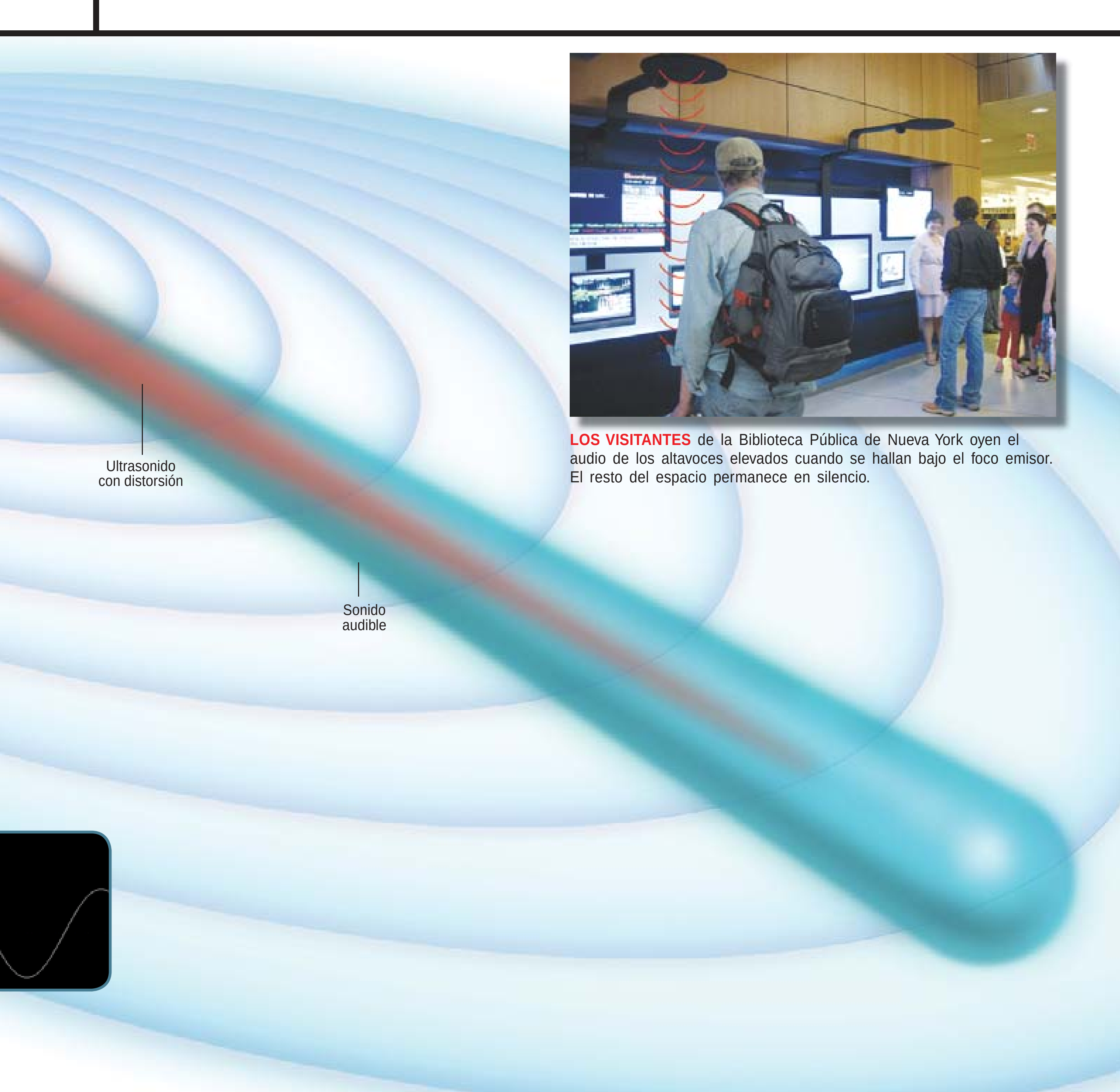
5W INFOGRAPHICS (*ilustración*); HOLOSONICS, INC. (*fotografía*)

## ¿SABIA USTED QUE...?

➤ REBOTES: Las ondas ultrasónicas se mantienen en columnas compactas al reflejarse en superficies duras y lisas. Las patrullas policiales podrían hacer rebotar un haz en un edificio situado al fondo de un callejón o en una ventana alejada de un almacén para hacer salir a unos sospechosos, que huirían a toda prisa del sonido, derechos a las manos de los agentes.

➤ MURCIELAGOS SI, PERROS NO: Ciertos animales detectan el ruido ultrasónico por encima del sonido dirigido audible. Las frecuencias de los altavoces ultrasónicos están comprendidas entre los 40.000 y los 80.000 ciclos por segundo, o hertz (Hz). Las personas oímos entre los 20 y los 20.000 Hz. Los perros captan hasta unos 40.000 Hz; los ratones, hasta los 90.000; los murciélagos, las marsopas y las ballenas beluga hasta los 100.000 Hz o más.

➤ PLUS: Los huesos del oído medio limitan la audición humana por debajo de los 20.000 Hz. Pero unos investigadores han aplicado ultrasonidos de hasta 200.000 Hz al cráneo de voluntarios; algunos de ellos aseguran haber oído sonidos. Quizás el cráneo distorsiona las vibraciones que llegan a la cóclea.




**LOS VISITANTES** de la Biblioteca Pública de Nueva York oyen el audio de los altavoces elevados cuando se hallan bajo el foco emisor. El resto del espacio permanece en silencio.

## Einstein

### *Teoría de la gravitación*

THE CURIOUS HISTORY OF RELATIVITY: HOW EINSTEIN'S THEORY OF GRAVITY WAS LOST AND FOUND AGAIN, por Jean Eisenstaedt. Princeton University Press; Princeton, New Jersey, 2006.

THE GENESIS OF GENERAL RELATIVITY. Dirigido por Jürgen Renn. Springer; Dordrecht, 2007.

THE REIGN OF RELATIVITY. PHILOSOPHY IN PHYSICS 1915-1925, por Thomas Ryckman. Oxford University Press; Oxford, 2005.

EINSTEIN'S JURY. THE RACE TO TEST RELATIVITY, por Jeffrey Crelinsten. Princeton University Press; Princeton, 2006.

Con la mecánica cuántica, la relatividad especial y general han conformado la física contemporánea. No se trata de cotos cerrados y conclusos. Las teorías de Einstein, en concreto, siguen su curso de desarrollo y búsqueda continua de pruebas de confirmación. Hace menos de un año, mediante la comparación de un par de púlsares, un equipo internacional de astrónomos sometía la teoría general de la relatividad a lo que podría ser su prueba más exigente hasta el momento: los resultados mostraron que la doctrina einsteiniana de la gravitación alcanzaba una precisión de al menos un 0,05 %, incluso en la gravedad ultraintensa de un púlsar, una estrella de neutrones que mide unos 20 kilómetros de diámetro y pesa más que el Sol. Pese a ello, se admite en física que la relatividad general no puede tener la última palabra sobre la gravedad, por su discrepancia con la mecánica cuántica.

Albert Einstein nació en 1879, en Ulm. Pasó su infancia en Múnich, donde su padre, un industrial eléctrico, se había instalado. Intentó sin éxito superar, en 1894, el examen de ingreso en el Politécnico de Zúrich, que le exigía una formación más sistemática en lenguas y otras materias. Cuando por fin pudo entrar, dos años después, se preparó para la carrera docente. Se enamoró de una compañera de clase, Mileva Marić, con la que tuvo una hija y, tras desposarse en 1903, dos hijos más. Se divorció de Mileva en 1919, para casarse con su prima Elsa Löwenthal.

Tras varios intentos fallidos de introducirse en el campo de la enseñanza, se trasladó a Berna en 1904 para trabajar en la oficina de patentes. Si el examen crítico de las solicitudes de patentes de ingenios electromagnéticos pudo instar sus lucubraciones sobre ideas asociadas a la teoría especial de la relatividad, descrita en una de sus contribuciones clásicas de 1905 aparecidas en los *Annalen der Physik,* no podemos decir lo mismo de las otras aportaciones: la exposición estadística del movimiento browniano y la propuesta del cuanto de luz. La obra creadora de 1905 partía de su preocupación por los fenómenos de fluctuación y, más en particular, de su insatisfacción ante la asimetría o falta de generalidad de determinadas teorías. Los tres artículos se proponían aunar y unificar opuestos aparentes y terminaban con breves propuestas de una serie de experimentos de confirmación.

La teoría especial de la relatividad revisaba la noción de espacio y tiempo, unificaba bajo una misma perspectiva electricidad, magnetismo y mecánica, arruinaba el concepto de éter y revelaba la equivalencia de masa y energía ($E = mc^2$). El advenimiento de la relatividad especial (*The Curious History of Relativity*) convirtió en tarea apremiante la revisión de la gravitación newtoniana. La propagación instantánea de la gravitación resultaba incompatible con el nuevo marco del espacio-tiempo en el que ningún efecto físico podía propagarse a velocidad mayor que la de la luz. Una revisión de ese tipo podía lograrse por diversas vías. Se podría formular una ley de acción a distancia que implicara un tiempo finito de propagación, tal como había sido desarrollado en el electromagnetismo. O bien podría formularse una teoría genuina de campos. En ese marco, la formulación tetradimensional de la relatividad especial que emerge de la obra de Henri Poincaré, Hermann Minkowski y Arnold Sommerfeld trajo un conjunto de enfoques alternativos para crear una teoría de campos. Mientras que la teoría clásica de la gravedad postulaba una acción instantánea a distancia, la nueva cinemática relativista de Einstein sugería una analogía entre el campo gravitatorio y el campo electromagnético, que se propagaba a una velocidad finita. No debe, pues, sorprendernos que Einstein no se encontrara solo a la hora de abordar el problema de la formulación de una teoría de la gravitación que se complica con la cinemática de la teoría de la relatividad.

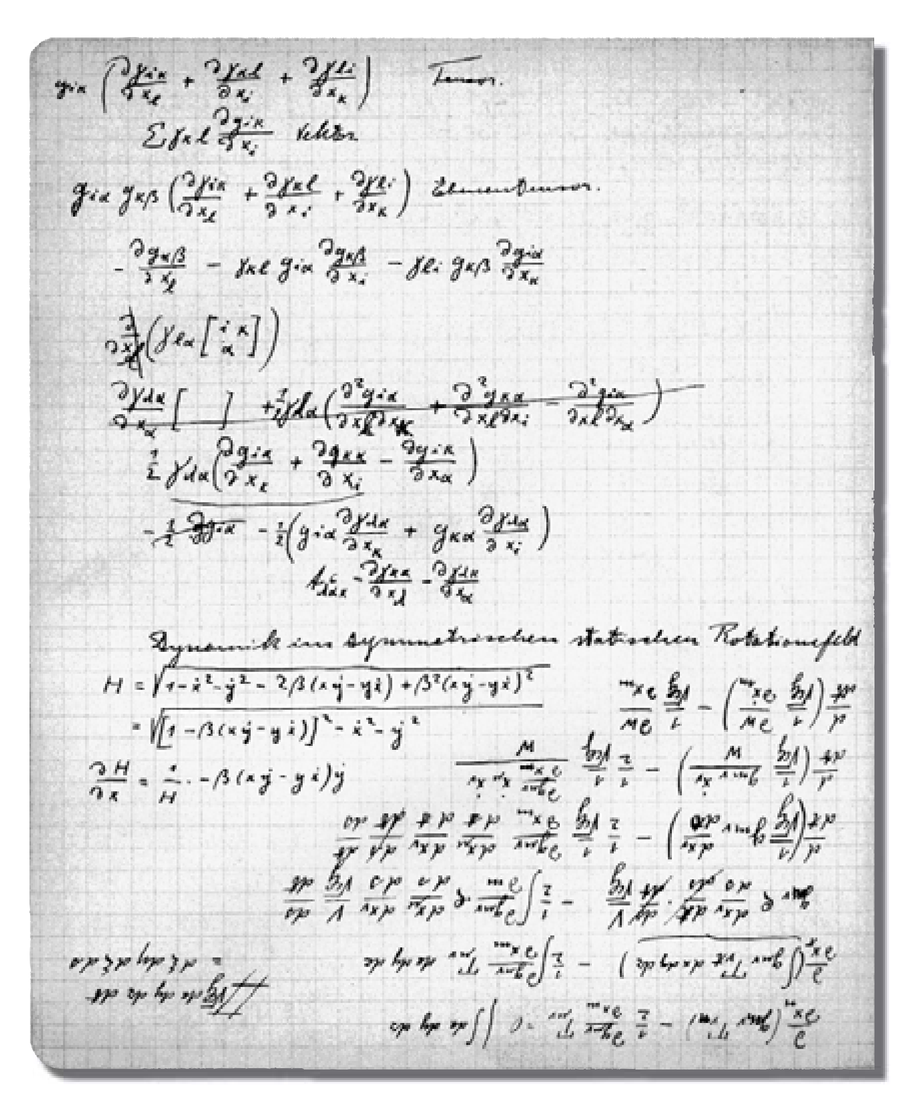
Recapitulemos la historia. Un problema central de la teoría newtoniana sobre la gravitación era que daba por supuesto que la acción entre dos cuerpos que se atraían era instantánea y que no aportaba explicación alguna del transporte instantáneo de la acción a lo largo de distancias arbitrarias. Este rasgo característico de la fuerza gravitatoria, denominado acción a distancia, se fue obscureciendo todavía más desde mediados del siglo XIX, cuando se reconoció que las fuerzas electromagnéticas no satisfacían la supuesta acción a distancia.

Los esfuerzos por resolver esos tipos de tensión cristalizaron en torno a modelos mentales que representaban la interacción gravitatoria sobre

la base de otros procesos y fenómenos físicos. Así, en el modelo del *gas*, la gravitación resultaba de las diferencias de presión de un éter gaseoso. En el modelo de la *sombrilla*, la atracción entre dos cuerpos obedecía al apantallamiento mutuo de los dos objetos en un éter cuyas partículas se mueven en direcciones aleatorias y, al colisionar con los átomos de materia, los empujan en la dirección de los movimientos de las partículas. Otros consideraban la gravitación en analogía con la descripción afortunada del electromagnetismo a través del modelo *de Lorentz*, aceptando una dicotomía de campo gravitatorio, por un lado, y, por otro, partículas dotadas de carga —masas— que operan como fuentes del campo. La elaboración de estos enfoques, mediante el auxilio del formalismo matemático, condujo a una proliferación ulterior de enfoques alternativos y, al propio tiempo, aportó los instrumentos para explorar esos enfoques alternativos hasta una profundidad que revelaba la aparición de nuevas tensiones.

La fama que Einstein iba adquiriendo facilitó su primer contrato docente de física, con la Universidad de Praga, en 1911. A éste seguirían el del Politécnico Suizo en 1912 y, en 1914, el soñado de Berlín. Su teoría general de la relatividad y teoría del campo unificado surgieron de la insatisfacción ante el carácter incompleto de la teoría especial de la relatividad. A los conceptos de probabilidad e indeterminación, fundamentales en mecánica cuántica, oponía la unidad a escala cosmológica, la simetría, simplicidad, completitud, continuidad, constancia, invariancia y causalidad. La teoría general de la relatividad reinterpretaba la gravitación como el efecto de la curvatura del espacio-tiempo y abría el camino hacia el desarrollo de la hasta ahora no conseguida teoría del campo unificado que habría de geometrizar los campos electromagnéticos.

¿Cómo se produjo el tránsito de la relatividad especial a la general? La respuesta se halla en el "cuaderno de Zúrich" de 1912-1913, estudiado en *The Genesis of General Relativity*, obra que consta de dos libros (*Einstein's Zurich Notebook* y *Gravitation in the Twilight of Classical Physics*), subdivido cada uno a su vez en un par de volúmenes. La obra, pergeñada por historiadores de la ciencia con un conocimiento de la física por encima de la media de los físicos profesionales, reconstruye el camino seguido por Einstein para llegar a la relatividad general y nos descubre el sentido genuino de la misma para su creador y sus contemporáneos, en un empeño por unificar la gravitación y la relatividad especial.

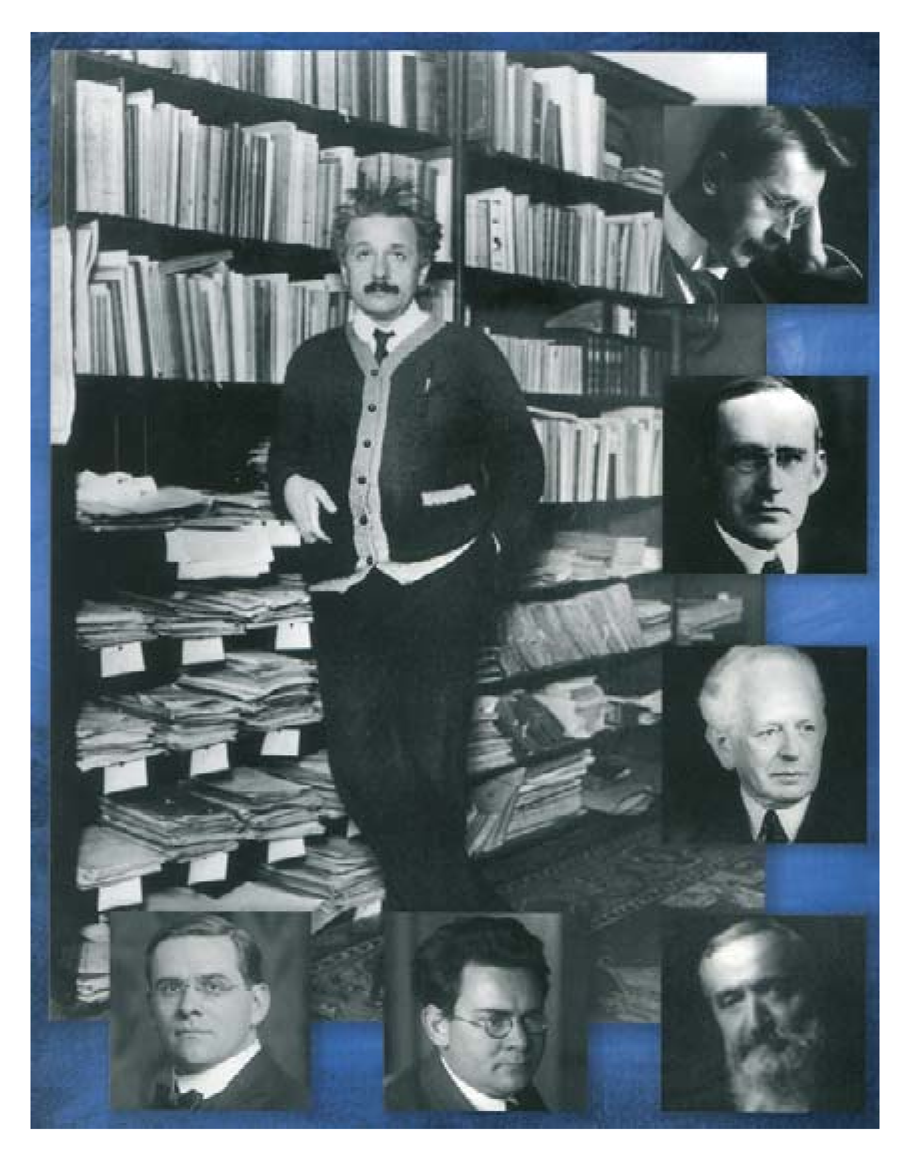


Página 43 del cuaderno de Zúrich.

En los dos primeros volúmenes se ofrecen el facsímil y nueva transcripción, con comentarios, del cuaderno. La investigación que Einstein iba anotando en sus páginas encierra el secreto de la maduración de la teoría general de la relatividad. Complementan ese material los ensayos que reevalúan la génesis de la teoría general, a la luz del análisis textual e histórico.

Los volúmenes tercero y cuarto están dedicados a las teorías de la gravitación en el marco general de la física clásica y a las alternativas a la propuesta einsteiniana. Primero se abordan las tensiones entre la tradición mecánica, el lugar canónico del problema de la gravitación, y la teoría de campos, que avivó la esperanza de una solución del problema. Una expectativa que se reafirmó con la introducción de la relatividad especial. Más adelante, en el volumen cuarto, se plantean las posibilidades de establecer una teoría similar a la relatividad general por vías distintas de la adoptada por Einstein y de mayor complejidad matemática. Tal, por ejemplo, con David Hilbert.

En breve, el grueso del cuaderno está consagrado a una nueva teoría de la gravedad, en la cual los diez componentes de la $g_{\mu\nu}$ del campo tensorial métrico cifran la geometría del espacio-tiempo. Se advierte allí que Einstein había estado a un paso de la teoría general final de la relati-



Albert Einstein, Hermann Weyl, A. S. Eddington, Ernst Cassirer, Emile Meyerson, Hans Reichenbach y Moritz Schlick (*en el sentido de las agujas del reloj, desde el centro*).

vidad. Fracasó, empero, a la hora de reconocer el significado físico de los resultados matemáticos y se dirigió hacia una estrategia alternativa, física. Muchos de los resultados finales de las investigaciones registradas en el cuaderno se publicaron en la primavera de 1913 en un artículo firmado por Einstein y Marcel Grossmann, profesor de matemáticas en el Instituto Politécnico de Zúrich y antiguo compañero suyo de clase. Llevaba por título "Un esbozo (*Entwurf*) de la teoría generalizada de la relatividad y una teoría de la gravitación". Esbozo que se demostró erróneo.

Einstein trabajó luego con Michele Besso, otro amigo de juventud. Con Besso estudió si la teoría esbozada podía dar cuenta del avance anómalo del perihelio de Mercurio, un problema clásico de la teoría gravitatoria newtoniana. No podía. En el otoño de 1914 publicó un extenso resumen de los esfuerzos realizados hasta entonces: "El fundamento formal de la teoría general de la relatividad". No acababa de acertar. Hasta que, en noviembre de 1915, sustituyó la pieza central de la teoría del *Entwurf*, un conjunto de ecuaciones del campo gravitatorio de covarianza restringida, por ecuaciones de campo de covarianza amplia y en definitiva general, resolviendo el problema del perihelio de Mercurio. Einstein había llegado, por fin, a la teoría general de la relatividad. En los años subsiguientes consolidó y depuró su teoría.

Einstein buscaba, en efecto, ecuaciones de campo para su nueva teoría métrica de la gravedad. Dos estrategias se advierten, una matemática y otra física. Siguiendo la estrategia matemática, Einstein vació la bibliografía por si hallaba expresiones que contuvieran derivadas de la métrica aplicables, a modo de bloques de construcción, para las ecuaciones del campo gravitatorio. Prosiguiendo la estrategia física, Einstein esperaba encontrar tales bloques de construcción laborando sobre la analogía entre el campo gravitatorio de su nueva teoría y el campo electromagnético de la electrodinámica clásica de Maxwell y Lorentz. El trabajo sobre la gravedad culminó con la publicación de las ecuaciones de campo de Einstein en noviembre de 1915.

La teoría de Einstein sobre la gravitación fue anunciada al mundo en una reunión conjunta de la Regia Sociedad y de la Real Sociedad Astronómica en Londres el 6 de noviembre de 1919. Informado por la expedición británica sobre la confirmación empírica de la teoría a través de observaciones del eclipse solar ocurrido seis meses antes, el premio Nobel J. J. Thomson caracterizaría la teoría general de la relatividad como uno de los grandes logros de la historia del pensamiento humano. Entre los primeros éxitos de la teoría general se numeraban la predicción del grado de desviación de la luz estelar a su paso por la vecindad del sol (observada en 1919 durante un eclipse); el desplazamiento hacia el rojo de la luz que atraviesa un campo gravitatorio; y la explicación de la precesión del planeta Mercurio. A partir de la teoría general de la relatividad, Einstein deducía la estabilidad de un universo espacialmente limitado mediante la adición de la constante cosmológica (de la que más tarde se retractaría), las ondas gravitatorias y la formación de imágenes de objetos remotos mediante el campo gravitatorio de galaxias próximas.

Según cabía esperar, la teoría de la relatividad tuvo repercusión principal entre los astrónomos, pese a que muy pocos estaban preparados para seguir su formalismo matemático (*Einstein's Jury*). Pero era la física matemática su lugar más idóneo (*The Reign of Relativity*): Hermann Weyl, uno de los grandes matemáticos del

siglo XX, realizó aportaciones a la teoría de la relatividad sólo superadas por el propio Einstein. Con Weyl, las figuras eximias de la relatividad general a comienzos de los veinte serían Hilbert, Wolfgang Pauli, Elie Cartan y George D. Birkhoff.

La revisión de los conceptos de espacio y tiempo por la relatividad general ejerció un profundo impacto en los debates filosóficos y epistemológicos. Para Russell, la teoría general de la relatividad constituía una fuente de novedades especulativas. El empirismo lógico admitió la influencia de la teoría de la relatividad en la conformación del núcleo de su doctrina y la desautorización del kantismo con sus juicios sintéticos a priori. Tuvo en ello mucho que ver Moritz Schlick, impulsor de ese movimiento positivista: "Pasando a la teoría general de la relatividad, se ve obligado a acudir a la geometría no euclideana para describir este mismo mundo. A través de Einstein, lo que Riemann y Helmholtz habían propuesto como posibilidad, se convierte ahora en realidad; la postura kantiana es insostenible y la filosofía empírica ha obtenido uno de sus triunfos más brillantes".

Schlick se había doctorado en física matemática con Max Planck en Berlín. Había escrito la primera monografía filosófica sobre la relatividad general y un libro de epistemología alabado por Einstein. Nada cuestionaba, pues, la autoridad de Schlick, que se extendió sobre Rudolf Carnap y Hans Reichenbach, quienes, junto con Otto Neurath, iban a convertirse en los sistematizadores genuinos del empirismo lógico. Su "método del análisis lógico" recibió una primera aplicación en la obra de Reichenbach *Axiomatización de la teoría de la relatividad* (*Axiomatik der relativischen Raum-Zeit-Lehre*), publicada en 1924. Constituye el primer intento sostenido de lo que se denominaría una "reconstrucción racional" de una teoría física.

—LUIS ALONSO

## Lanzadera espacial

**THE STORY OF THE SPACE SHUTTLE,** por David M. Harland. Springer and Praxis Books in Astronomy and Space Sciences; Chichester, 2004.

La lanzadera espacial está reconocida como el vehículo espacial más conseguido hasta la fecha. Entre el doce y el catorce de abril de 1981, la nave Columbia realizaba su primer vuelo de pruebas con John Young (uno de los doce hombres que ya habían pisado la Luna, con dos misiones Géminis y dos misiones Apolo en su haber) como jefe de la misión, acompañado de Bob Crippen, experto en informática. La lanzadera había sido diseñada con el propósito de conseguir un acceso barato a las órbitas terrestres bajas como sustituto de los vehículos de lanzamiento desechables. Desde entonces, pese a las catástrofes de la Columbia y la Challenger, el número de misiones llevadas a cabo por la flota de lanzaderas de la NASA supera largamente el centenar.

Todos los que se interesan por la historia de las exploraciones espaciales, en sus diversos aspectos, saben perfectamente que los libros de Springer-Praxis sobre el tema son referencias ineludibles, pues su redacción corre a cargo de especialistas. David M. Harland, de cuyo libro *Mission to Saturn* ya nos ocupamos en estas mismas páginas [*véase* INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto 2003], nos ofrece un texto que obedece a la tónica que caracteriza a la colección: información bien documentada, exposición rigurosa de hechos y datos, y amenidad.

A lo largo de sus casi cuatrocientas páginas de texto, el autor trata de la historia de la lanzadera espacial con una destreza más que suficiente para que la extrema atención a los detalles, técnicos así como factuales, no cansen al lector; antes bien, éste se halla atrapado enseguida en la fluidez del lenguaje. *The Story...* ofrece todo un cuadro histórico en perspectiva, completa y pormenorizada, en la que quizá se preste más atención al uso que a los aspectos técnicos de estas naves y a su desarrollo.

Aproximadamente la mitad del texto corresponde a una exposición ordenada cronológicamente de las misiones llevadas a cabo por la flota de lanzaderas. La segunda mitad está dedicada a los paseos espaciales, los estudios científicos acometidos con su concurso (puede que a los lectores menos al tanto de las implicaciones de nuestro acceso al espacio ultraterrestre les resulten especialmente interesantes los capítulos dedicados a la microgravedad y al estudio de la Tierra), y sus misiones a la estación rusa Mir, al telescopio espacial Hubble y, en los últimos años, a la Estación Espacial Internacional.



Lanzadera espacial Columbia

Se cierra el libro con sendos capítulos dedicados a la pérdida de la lanzadera Columbia, en el que se informa acerca del período anterior a la reanudación de las operaciones, y a las reflexiones en torno a las ideas puestas en juego con vistas a sustituir las lanzaderas por otros vehículos parcial o totalmente reutilizables.

—J. VILARDELL

Jeffrey D. Sachs

## Comienza el camino hacia una energía limpia

Para poner en práctica las técnicas energéticas indispensables hará falta algo más que investigación y desarrollo

La clave para resolver la crisis del cambio climático es la técnica. Para satisfacer las aspiraciones económicas de los más de cinco mil millones de habitantes de los países en vías de desarrollo, la producción económica mundial tendría que multiplicarse por un factor de entre cuatro y seis para el año 2050; al mismo tiempo, las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero deberían mantenerse estables, o disminuir, para prevenir peligrosos cambios climáticos. Después de 2050, las emisiones habrían de cercenarse todavía más, dejarlas casi a cero, para que se estabilicen las concentraciones de gases de efecto invernadero.

El reto estriba en que esa transición se haga con el mínimo coste y sin perjuicios económicos. Las técnicas que ahorran energía desempeñan una función fundamental. Se puede ahorrar energía en los edificios a un coste bajo; en ocasiones con un ahorro neto final, mejorando el aislamiento, instalando una iluminación eficiente y utilizando bombas de calor en vez de calderas. Con el tiempo, los automóviles llegarían a consumir menos de 2,5 litros a los 100 km si se produjese una transición hacia los modelos híbridos, unas baterías mejores y unas carrocerías menos pesadas, entre otros cambios. Claro está que las bombas de calor y los híbridos reducen las emisiones directas, pasando de la combustión *in situ* a la electricidad: las plantas de energía de baja emisión se hacen primordiales.

**Algunas técnicas supondrán costes reales añadidos; otras se financiarán por sí solas.**

Se conseguirá generar electricidad de baja emisión en parte por medio de fuentes de energía que no pueden pasar de complementarias, como la eólica y los biocombustibles. Las soluciones a mayor escala vendrán de las energías nuclear y solar. Aun así el carbón limpio será fundamental. Gracias a las nuevas técnicas de combustión, combinadas con la captación y almacenamiento de carbono (CAC), las emisiones de las plantas térmicas de carbón podrían llegar a ser bajas o nulas. El incremento de los costes de la CAC sería mínimo, entre uno y tres céntimos de dólar por kilowatt/hora.

Todas estas técnicas son asequibles. Algunas supondrán costes reales añadidos; otras se financiarán por sí solas cuando al pagar menos por el recibo de energía se compense el capital invertido en ellas. Algunas estimaciones sugieren que para 2050 el mundo tendrá que evitar alrededor de 30.000 millones de toneladas de emisiones de dióxido de carbono al año, a un coste de unos 25 dólares por tonelada o 750.000 millones anuales. Pero con una economía mundial que para entonces alcanzará quizá los 200 billones de dólares, el coste supondría menos del 1 por ciento de esa riqueza, incluso menos del 0,5 por ciento, una verdadera ganga comparada con el precio que pagaríamos si no hiciéramos nada.

Sin embargo, llegar a estas soluciones a gran escala requerirá una política tecnológica global firme. En primer lugar, tendrá que haber incentivos de mercado para la eliminación de las emisiones, en forma de permisos negociables o tasas. Una tasa razonable podría ser 25 dólares por tonelada de dióxido de carbono emitida, que se podría implantar gradualmente a lo largo de los próximos 10 o 20 años. En segundo lugar, para llevar a cabo un rápido cambio tecnológico se necesitará amplio apoyo gubernamental. Aunque las patentes pueden ayudar a estimular la investigación y el desarrollo en el mercado privado (I+D), es necesaria la financiación pública para la ciencia básica, así como para llevar a cabo la *demostración* pública y la *difusión* global de las nuevas técnicas. En suma, necesitamos una estrategia a la que en ocasiones se denomina IDD+D.

En los dos últimos años, el Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia ha celebrado una Mesa Redonda sobre Cambio Climático con la participación de empresas de todo el mundo. Estas compañías, entre ellas muchas de las productoras de energía principales, se muestran dispuestas a reducir las emisiones de carbono y saben que la CAC es una prioridad fundamental. Un nuevo Grupo de Trabajo de la Mesa Redonda Mundial de la CAC se encarga de promover la necesaria IDD+D.

Afortunadamente, la Unión Europea ya ha prometido que emprenderá una docena de proyectos de demostración de la CAC en Europa para 2015. Pero se requerirán centros de este tipo en EE.UU., China, India, Australia, Indonesia y otras naciones grandes productoras de energía a partir del carbón. En los países con bajos ingresos harán falta algunos miles de millones de dólares; aquí es donde será fundamental la inversión en IDD+D de los países de rentas altas.

El Equipo de Trabajo de la CAC se propone crear una o más plantas de demostración para 2010 en cada una de las regiones productoras de carbón importantes. Para 2015 se podrá ensayar esta técnica indispensable, lo que supondrá un nuevo avance en el empeño de evitar el desastre climático. Este modelo de IDD+D no terminará aquí. La puesta en marcha de las técnicas capaces de generar energía de forma sostenible requerirá gran parte de la inversión económica mundial durante las décadas venideras.

---

*Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia* (www.earth.columbia.edu).

## ...DE AGOSTO 2007






### EL ORIGEN DE LA VIDA, por Robert Shapiro

La aparición repentina de una macromolécula autorreplicante como el ARN era extremadamente improbable. Los iniciadores de la vida habrían sido más bien entramados de pequeñas moléculas impulsados por una fuente de energía.



### CONTAMINACION DE LAS PLAYAS, por Michel A. Mallin

El desarrollo incontrolado a lo largo de las costas provoca una creciente contaminación por microorganismos patógenos.



### RECUPERACION DE LA FAUNA PLEISTOCENICA, por C. Josh Donlan

Un proyecto para la recuperación de animales que desaparecieron de Norteamérica hace 13.000 años ofrece un programa optimista para la conservación en el siglo XXI.

### COSMOLOGIA DE PARTICULAS, por David Kaiser

La historia de la cosmología de partículas, una nueva rama de la física que ha iluminado los orígenes del universo, demuestra la importancia de los cambios de rumbo en el avance de la ciencia.



### LEPIDOSAURIOS EN MOVIMINETO: DE LOS LAGARTOS A LAS SERPIENTES, por Sebastián Apesteguía

“Marinistas” y “terrestristas” sostienen ideas diferentes acerca de la historia de las serpientes: ¿se originaron en el mar o en tierra? ¿En el Cretácico o en el Jurásico?